



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

- Mestrado – Doutorado

**ANÁLISE DA INJEÇÃO DE GÁS NATURAL VEICULAR
EM MOTORES DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO COM
USO DE BIODIESEL EM DIFERENTES PROPORÇÕES.**

Por

Filipe Rocha Gouveia

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da
Paraíba para obtenção do grau de Mestre*

João Pessoa – Paraíba

Agosto, 2016

FILIPPE ROCHA GOUVEIA

**ANÁLISE DA INJEÇÃO DE GÁS NATURAL VEICULAR
EM MOTORES DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO COM
USO DE BIODIESEL EM DIFERENTES PROPORÇÕES.**

Dissertação apresentada à banca
examinadora do Curso de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica na área de
concentração Termoflúidos da
Universidade Federal da Paraíba, em
cumprimento às exigências para obtenção
do Grau de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Antonio Cabral dos Santos

João Pessoa – Paraíba

Agosto, 2016

**ANÁLISE DA INJEÇÃO DE GÁS NATURAL VEICULAR
EM MOTORES DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO COM
USO DE BIODIESEL EM DIFERENTES PROPORÇÕES.**

por

Filipe Rocha Gouveia

Dissertação aprovada em 30 de agosto de 2016

Período letivo 2016.1

Prof. Dr. CARLOS ANTONIO CABRAL DOS SANTOS

Orientador – UFPB

Prof. Dr. LESSO BENEDITO DOS SANTOS

Coorientador - IFAL

Prof. Dr. ABEL CAVALCANTE LIMA FILHO

Examinador Interno – UFPB

Prof. Dr. JEAN PIERRE VERONESE

Examinador Externo – UFPB

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelas oportunidades mostradas ao longo da minha trajetória de vida, e pela força para continuar nessa luta constante.

Agradeço a Maria, Mãe de Deus e de todos os homens, pela companhia e bênçãos obtidas em minha vida pessoal e acadêmica.

Agradeço a minha família, minha mãe Maria Lêda Dias Rocha, ao meu Pai Valtergralson Bandeira Gouveia, por todo apoio e investimento em minha educação e formação acadêmica.

Agradeço a meus amigos de formação acadêmica que deram suporte bem como aos amigos profissionais e amigos em geral que sempre deram força e apoio.

Ao Prof. Dr. Carlos Antonio Cabral dos Santos, meu orientador, e aos colegas do mestrado, agradeço pelos aprendizados e apoio.

Agradeço em especial ao Prof. Dr. Lesso Benedito dos Santos por todo apoio e dedicação em prol da realização do projeto e ao seu filho Ledson, pela contribuição para realizar os experimentos.

Agradeço em especial também a Roberta Lígia Cavalcanti Lima por toda ajuda e horas dedicadas na realização dos experimentos e elaboração da dissertação.

Agradeço a FCA – Fiat Chrysler Automobiles na pessoa do Sr. Mario Randazzo, calibration manager da área Diesel, pelo suporte e atenção

Agradeço a Bosch Diesel na pessoa do Sr. Christian Wanhfried, gerente da área de biocombustíveis, pela contribuição com informações técnicas e atenção cedida.

Agradeço ao Cogencasa – UFPE e Jorge Migueis Ricartes do PPGEM – UFPE, pela contribuição com a doação do combustível Biodiesel.

ANÁLISE DA INJEÇÃO DE GÁS NATURAL VEICULAR EM MOTORES DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO COM USO DE BIODIESEL EM DIFERENTES PROPORÇÕES

RESUMO

Em busca por maior eficiência energética há a aplicação de novas tecnologias e combustíveis renováveis. Devido a previsível escassez de petróleo aliada a uma consciência ambiental, tem-se elevado potencialmente pesquisas por novas fontes de energia e processos de combustão mais eficientes e menos poluentes. Entre os combustíveis menos poluentes está o gás natural, que tem um consumo aumentado ano a ano. O presente trabalho analisa a injeção de gás natural veicular (GNV) em um motor de combustão interna de ignição por compressão, avaliando os níveis de emissões de poluentes, opacidade e o rendimento. No motor em estudo, a energia provém da combustão do gás natural e do biodiesel, onde o biodiesel tem a função de produzir a ignição do gás natural, sendo possível a substituição de até 80% da injeção do biodiesel. Assim, haverá uma substituição parcial de biodiesel por gás natural, a fim de aumentar o rendimento da combustão. No motor MWM 4.07 TCE foi desenvolvido um sistema de injeção eletrônico adaptado para reduzir o tempo de injeção do biodiesel por ciclo e compensar com injeção de GNV. Baseando-se em um levantamento do fluxo de massa injetada por ciclo para calcular o valor energético equivalente a redução das proporções de injeção de biodiesel a compensar com injeção de GNV. Houve uma redução do torque de acordo com o aumento da proporção de biodiesel no óleo diesel e um maior consumo específico com a utilização do combustível B7 (7% de biodiesel). Foi constatada a necessidade de injeção de maior quantidade de massa de GNV em substituição do combustível B7. Em relação as emissões de gases poluentes na exaustão medidos na faixa de rotação de trabalho do motor os menores níveis de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrocarbonetos (HC), óxidos de nitrogênio (NO_x), foram verificados respectivamente na aplicação dos combustíveis B7, B20, B50 e B50. Os menores níveis de opacidade foram averiguados em testes com utilização do combustível B10.

Palavras-chaves: Biodiesel; gás natural veicular; injeção eletrônica

ANALYSIS OF VEHICLE NATURAL GAS INJECTION IN COMPRESSION IGNITION ENGINES WITH USE OF BIODIESEL IN DIFFERENT PORPORTIONS.

ABSTRACT

In search for greater energy efficiency there is the application of new technologies and renewable fuels. Due to the expected shortage of oil coupled with environmental awareness, has high potential research for new energy sources and more efficient combustion processes and less polluting. Among the less polluting fuels is natural gas that has an increased consumption year on year. This paper analyzes the injection of compressed natural gas (CNG) in an internal combustion engine compression ignition, evaluating the pollutant emissions, opacity and performance. The engine under study, the energy comes from the combustion of natural gas and biodiesel, where biodiesel serves to ignite the natural gas, being possible to replace up to 80% of biodiesel injection. Thus, there is a partial substitution of biodiesel natural gas in order to increase the combustion efficiency. Engine MWM 4:07 TEC has developed an electronic injection system adapted to reduce the biodiesel injection time per cycle and compensate with CNG injection. Based on a survey of injected cycle mass flow to calculate the energy value equivalent to reducing biodiesel injection proportions to compensate with CNG injection. There was a reduction in the torque according to the increase of the proportion of biodiesel in the diesel fuel and a higher specific consumption with the use of B7 fuel (7% biodiesel). It has been found the need for injection of a larger amount of mass CNG instead of B7 fuel. Regarding the emission of pollutants in the exhaust measured at a range of engine working speed smaller carbon monoxide level (CO), carbon dioxide (CO₂), hydrocarbons (HC), nitrogen oxides (NO_x) were checked respectively in the application of B7 fuels, B20, B50 and B50. The lowest levels of opacity were investigated in tests using the B10 fuel.

Keywords: biodiesel; vehicular natural gas; electronic injection.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	1
INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVO GERAL	2
1.2. OBJETIVO ESPECÍFICO	3
CAPÍTULO II	4
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	Error! Bookmark not defined.
2.1. Motores de Combustão Interna	4
2.1.1. Motores de Combustão Interna de Ignição por Centelha	4
2.1.2. Motores de Combustão Interna de Ignição por Compressão	5
2.1.3. Motores de Combustão Interna Ciclo Dual	6
2.2. Combustíveis Alternativos Para Motores ICO	8
2.2.1. Etanol	8
2.2.2. Gás Natural	12
2.2.3. Óleo Diesel	15
2.2.4. Biodiesel	19
2.3. Poder Calorífico de um Combustível	23
2.4. Analisador de Potência	26
2.4.1. Dinamômetro Hidráulico	27
2.4.2. Dinamômetro Elétrico	28
2.5. Emissões dos Principais Gases Poluentes em Motores ICO	29
2.5.1. Hidrocarbonetos	29
2.5.2. Monóxido de Carbono	30
2.5.3. Óxidos de Nitrogênio	31
2.5.4. Material Particulado	32
CAPÍTULO III	34
INJEÇÃO ELETRÔNICA DE COMBUSTÍVEL EM SISTEMAS DUAL FUEL ...	34
3.1. SISTEMA COMMON RAIL DE CONTROLE DA INJEÇÃO ELETRÔNICA DE COMBUSTÍVEL	34
3.1.1. Introdução	34
3.1.2. Principais Componentes Do Sistema Common Rail De Injeção Eletrônica .	35
3.1.3. Princípio de Funcionamento Sistema Common Rail De Injeção Eletrônica	38
CAPÍTULO IV	40

BANCADA EXPERIMENTAL	40
4.1. Motor MWM 4.07 TCE	40
4.2. Dinamômetro.....	42
4.2.1. Acoplamento motor dinamômetro	43
4.2.2. Sistema de aquisição de dados do dinamômetro	44
4.3. Reservatórios de combustível	45
4.3.1. Reservatório do combustível óleo Diesel	45
4.3.2. Reservatório de GNV (cilindro GNV)	46
4.4. Redutor de pressão do gás natural veicular (GNV).....	48
4.5. Eletroválvulas de injeção do GNV	49
4.6. Sistema de controle Biodiesel-GNV (Placa de aquisição e microcontrolador)	50
4.7. Scanner NAPRO PC TRUCK 5000.....	52
4.8. Osciloscópio InfiniiVision MSO-X 2012A	55
4.9. Analisadores de Emissões	56
4.9.1. Analisador de gases PC-MULTIGÁS.....	56
4.9.2. Analisador de Opacidade NA9000	57
CAPÍTULO V	60
METODOLOGIA EXPERIMENTAL	60
5. Introdução	60
5.1. Poder Calorífico das Misturas de Biodiesel Ensaaiadas.....	60
5.2. Cálculo Para Formulação das Misturas de Biodiesel	63
5.3. Medição do Tempo de Injeção por Rotação	65
5.4. Medição dos Gases de Exaustão e Opacidade.....	68
5.5. Medição do Consumo das Misturas de Combustíveis Ensaaiadas.....	73
5.6. Cálculo do Consumo Específico de Combustível.....	74
5.7. Cálculo do Energético de Biodiesel Injetado por Ciclo Motor para Dada Rotação ..	76
CAPÍTULO VI	82
RESULTADOS E ANALISES.....	82
6. Introdução	82
6.1. Curvas de Tempo de injeção Para Cada Mistura Combustível.....	82
6.2. Curvas de Torque e Potência para Cada Mistura de Combustível.....	83
6.3. Consumo no Tempo e Consumo Específico de Combustível.....	84
6.4. Curva da Quantidade de GNV para substituição de 50% de Biodiesel.....	86
6.5. Emissões na Exaustão.....	87

6.6. Opacidade nos Gases de Exaustão	91
CAPÍTULO VII	93
CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	93
7. Introdução	93
7.1. Conclusões	93
7.2. Sugestões para futuros trabalhos	94
REFERÊNCIAS	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo real dos motores de ignição por centelha seus diagramas P-V	5
Figura 2 - Diagrama P-V e T-S do Ciclo Diesel.....	6
Figura 3 – Diagrama P-V do ciclo dual	7
Figura 4 – Diagrama T-S do ciclo dual.....	7
Figura 5 – Bomba calorimétrica	23
Figura 6 – Esquema de um freio dinamométrico.....	26
Figura 7 – Ilustração do funcionamento do dinamômetro hidráulico	27
Figura 8 – Dinamômetro de corrente foucault	29
Figura 9 – Vista esquemática dos componentes de um sistema de injeção Common Rail	35
Figura 10 - Pode-se identificar os diversos componentes do sistema common rail	39
Figura 11 - Motor MWM 4.07 TCE	40
Figura 12 - Dinamômetro LOGS Elétrico Acoplado ao Motor MWM 4.07 TCE	43
Figura 13 - Acoplamento Antaris AT versão especial com espaçador, acoplado entre o dinamômetro e motor MWM 4.07 TCE.....	44
Figura 14 - Sistema de Aquisição de Dados do Dinamômetro LOGS	45
Figura 15 - Reservatório de combustível óleo diesel.....	46
Figura 16 – Balança e suporte do Reservatório de GNV (cilindro GNV)	47
Figura 17 - Redutor de pressão positiva.....	48
Figura 18 - Galeria de injetores	49
Figura 19 - Conjunto de injetores Landi Renzo Instalado no Motor MWM 4.07 TCE..	50
Figura 20 - Fluxograma do sistema biodiesel-GNV	52
Figura 21 - Scanner NAPRO PC TRUCK 5000.....	53
Figura 22 – Ocisloscópio InfiniiVision MSO-X 2012 ^a	55
Figura 23 – Analisador de Gases PC-MULTIGÁS.	57
Figura 24 – Analisador de Opacidade NA9000.....	58
Figura 26 - Preparação de amostra de combustível B20.....	64
Figura 27 – Combustíveis biodiesel B10, B20 e B50.....	65
Figura 28- Bico injetor Bosch, aplicação motor MWM 4.07 TCE	66
Figura 29 – Modo contínuo do Scanner Napro Pc Truck 5000.....	67
Figura 30 – Medição de tempo de injeção	68

Figura 31 – Acessório do PC-Multigás para ler a rotação do motor	69
Figura 32 – Relatório das emissões de poluentes instantânea para B20 a 800rpm	70
Figura 33 – analisador de opacidade NA-9000T da Napro Eletrônica	71
Figura 34 – Relatório da opacidade dos gases e coeficiente de absorção da luz para B20 a 800rpm.....	72
Figura 35 - Recipiente e balança para medição de consumo	73
Figura 36 - Tempo de injeção x Rotação	82
Figura 37 - Torque x Rotação.....	83
Figura 38 – Potência X Rotação	84
Figura 39 – Consumo de combustível x Rotação	85
Figura 40 - Consumo Específico de Combustível x Rotação.....	85
Figura 41 - Energético de 50% de Biodiesel x Rotação.....	86
Figura 42 – Massa de GNV x Rotação	86
Figura 43 – Volume de GNV x Rotação.....	87
Figura 44 – CO x Rotação.....	88
Figura 45 - CO ₂ (%VOL) x Rotação.....	88
Figura 46 - O ₂ (%VOL) x Rotação	89
Figura 47 – HC x Rotação.....	90
Figura 48 – NO _x (PPM) x Rotação.....	90
Figura 49 – Opacidade x Rotação.....	91
Figura 50 – K (coeficiente de absorção da luz) x Rotação.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações do EAC, EHC e EHCP	9
Tabela 2 - Características do EHC que deverão estar presentes no boletim de conformidade emitido pelo distribuidor de etanol ¹	10
Tabela 3 - Especificação do corante a ser adicionado ao EAC	11
Tabela 4 - Especificação para o Gás Natural Comercializado no Brasil	12
Tabela 5 - Especificação do óleo Diesel	16
Tabela 6 - Ponto de Entupimento de Filtro a Frio	18
Tabela 7 – Especificação de Biodiesel.....	20
Tabela 8 – Ponto de Entupimento de Filtro a Frio.....	22
Tabela 9 - Dados técnicos do motor MWM	40
Tabela 10 - Dados técnicos do sistema de lubrificação do motor MWM TCE 4.07.....	41
Tabela 11- Dados técnicos do sistema de arrefecimento do motor MWM 4.07 TCE	42
Tabela 12 - Dados técnicos do sistema de combustível do motor MWM 4.07 TCE.....	42
Tabela 13 - Poder calorífico do biodiesel de diferentes origens.....	60
Tabela 14 – Poder calorífico superior de amostras de biodiesel usado como referência	61
Tabela 15 - Poder calorífico superior utilizado como referência	62
Tabela 16 - Poder calorífico inferior calculado	63
Tabela 17 - Média de consumo da massa de combustível	74
Tabela 18 – Consumo específico de combustível.....	75
Tabela 19 - Valores energético de biodiesel	77
Tabela 20 - Composição do gás natural no Estado da Paraíba – PBGÀS	78
Tabela 21 - Propriedade do gás natural no Estado da Paraíba – PBGÀS	79
Tabela 22 - Quantidade de massa de GNV para reposição da injeção de biodiesel	80

SÍMBOLOS E NOMECLATURAS

Q	Vazão Volumétrica [m^3/s]
V	Volume [m^3]
t	Tempo [s]
\dot{m}	Vazão Mássica [kg/s]
m	Massa [kg]
C_v	Calor específico a volume constante [$\text{kJ/kg } ^\circ\text{C}$]
C_p	Calor específico a pressão constante [$\text{kJ/kg } ^\circ\text{C}$]
T	Temperatura [$^\circ\text{C}$]
CEC	Consumo Específico de Combustível [g/kw h]

ABREVIATURAS E SIGLAS

MCI – Motor de Combustão Interna;

ICE – Ignição por Centelha;

ICO – Ignição por Compressão;

PMI – Ponto Morto Inferior;

PMS – Ponto Morto Superior;

UCE – Unidade de controle eletrônica.

ECM – Engine Control Module

PCS – Poder Calórico Superior

PCI – Poder Calórico Inferior

GNV – Gás Natural Veicular

B7 – Óleo Diesel Composto com 7% de Biodiesel

B10 – Óleo Diesel Composto com 10% de Biodiesel

B20 - Óleo Diesel Composto com 20% de Biodiesel

B50 - Óleo Diesel Composto com 50% de Biodiesel

AEHC – Álcool Etílico Hidratado Combustível

AEAC - Álcool Etílico Anidro Combustível

EAC – Etanol Anidro Combustível

EHC – Etanol Hidratado Combustível

EHCP – Etanol Hidratado Combustível Premium

UPGN - Unidade de Processamento de Gás Natural

PCp - Poder Calorífico a Pressão Constante

PCv - Poder Calorífico a Volume Constante

NO_x - Óxidos de Nitrogênio

NO - Óxido Nítrico

NO₂ - Dióxido de Nitrogênio

CO – Monóxido de Carbono

CO₂ - Dióxido de Carbono

HC – Hidrocarboneto

N₂ - Nitrogênio

O₂ – Oxigênio

ASTM - American Society for Testing and Materials

ISO - International Organization for Standardization

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e
Biocombustíveis

EPA - U.S. Environmental Protection Agency

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Com o aumento da utilização de máquinas e processos que emitem gases poluentes contribuindo para uma maior degradação da camada de ozônio e uma busca do governo para reduzir a importação de petróleo, medidas para diminuir a dependência de combustíveis derivados de petróleo e diminuição da emissão de poluentes fazem-se necessárias. Entre as medidas adotadas, mais recentemente encontra-se a alternativa do gás natural, um combustível menos poluente, de baixo custo e abundante, que pode substituir com vantagens outros combustíveis oriundos do petróleo em quase todas as aplicações, inclusive para alimentar motores de combustão interna. O gás natural tem um índice de octanas muito elevado, podendo chegar a 140 octanas. Índice de octanas, é um índice empírico que mede a capacidade de uma mistura estequiométrica de um combustível com ar, de suportar a pressões elevadas sem entrar em combustão espontânea. Nos motores ICO (ignição por compressão), a combustão ocorre espontaneamente devido à alta pressão a que fica submetido o ar, na câmara de combustão, onde o combustível Diesel é injetado. Portanto, se um motor ICO for alimentado apenas por gás natural, não haverá combustão porque o gás natural tem um elevado índice de octanas e, portanto, suporta a elevada taxa de compressão sem entrar em combustão. Isso configura um problema, um motor de ignição por compressão, em condições normais, não funciona só com gás natural.

Para solução tem-se a alternativa da aplicação de um motor dual ou bicomcombustível, que é aquele que trabalha simultaneamente com dois combustíveis e, em geral, são motores ciclo Diesel que trabalham com óleo Diesel e outro combustível que pode ser gasoso ou líquido vaporizado. Nesse caso, o gás ou vapor é introduzido juntamente com o ar na fase de admissão, e a ignição é efetuada por uma injeção-piloto de óleo diesel. O óleo Diesel continua sendo usado normalmente, porém apenas como combustível piloto para proporcionar a ignição por compressão, dando início à combustão do combustível principal (gás ou líquido vaporizado) que é admitido no cilindro pelo coletor de admissão, semelhante à alimentação de um motor de ciclo Otto. Esse sistema apresenta a vantagem de não exigir modificações no motor.

O fundamento deste trabalho é avaliar os resultados de emissões de poluentes e

rendimento, utilizando um sistema eletrônico capaz de reduzir o tempo de injeção original do óleo diesel e injetar GNV para compensação, sendo assim o sistema utiliza o regime bicom bustível, onde é feita a análise do melhor tempo de injeção de gás natural, através do balanço energético, construindo assim um mapa de injeção para o gás natural, afim de otimizar o rendimento da combustão.

Para tal o ensaio é realizado em um motor de combustão interna de ignição por compressão com o sistema de injeção eletrônica adaptado. O motor se encontra acoplado a um dinamômetro elétrico dotado de um sistema de aquisição de dados em tempo real. É medido o consumo de cada proporção de biodiesel (B7, B10, B20, B50) utilizado no estudo com intuito de levantar o consumo por ciclo do motor, e através do poder calorífico inferior (PCI) de cada mistura utilizada é possível calcular a quantidade de energia que está sendo injetada por ciclo. Tal levantamento serve de base para cálculo do fluxo de massa de injeção do GNV, de posse da energia injetada de biodiesel por ciclo é feito o cálculo da retirada de 50% da injeção do biodiesel e o valor correspondente a massa retirada é calculado em valor energético, onde é convertido em quantidade de massa necessária de GNV para suprir a retirada dos 50% do biodiesel.

São traçada as curvas de consumo específico de combustível, tempo de injeção, torque, potência e avaliando as emissões de poluentes para as 4 proporções de biodiesel utilizadas no estudo, bem como é traçada a curva da quantidade de GNV necessário para restituir o valor energético cortado em 50% de cada mistura de biodiesel ensaiada e são feitas análises entre as curvas obtidas e o nível de emissões de poluentes para determinar quais as melhores condições de funcionamento do motor.

1.1. OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo a análise sobre a equivalência energética em substituição da aplicação do óleo diesel em motores de ignição por compressão. É quantificando a massa necessária para substituição da injeção de cada proporção de biodiesel pelo gás natural em busca de conservar a energia antes inserida no sistema. São utilizadas diferentes proporções de biodiesel, onde para cada uma, há uma energia equivalente a quantidade de biodiesel contida no óleo diesel.

1.2. OBJETIVO ESPECÍFICO

Como objetivo específico tem-se a análise dos dados e resultados obtidos dos experimentos realizados no motor de combustão interna por compressão para parametrização do melhor tempo de injeção do gás natural, a fim de melhorar o rendimento da combustão.

Para tanto realiza-se medições do tempo de injeção do motor utilizando biodiesel em diferentes proporções, concomitante faz-se a medição do consumo para cada proporção em determinado tempo e a análise dos gases de exaustão de cada proporção de biodiesel utilizada no experimento.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTAÇÃO TEORICA

2.1. Motores de Combustão Interna

Motores de combustão interna (MCI) são máquinas térmicas que transformam a energia proveniente de uma reação química em energia mecânica. São considerados motores de combustão interna aqueles que utilizam os próprios gases de combustão como fluido de trabalho. Ou seja, são estes gases que realizam os processos de compressão, combustão, expansão e finalmente exaustão.

2.1.1. Motores de Combustão Interna de Ignição por Centelha

O motor a combustão interna ciclo Otto ou de ignição por centelha utiliza a energia da centelha elétrica da vela de ignição para dar início a reação de combustão.

Os quatro tempos de um MCI ciclo Otto se constituem dos seguintes processos:

- 1- Admissão, neste processo o pistão está no ponto morto superior (PMS) e desce para o ponto morto inferior (PMI) através do movimento descendente, o qual cria uma sucção, a válvula de admissão ao ser acionada permite a passagem de ar e combustível para o interior do cilindro até que o pistão chegue ao PMI, ver Figura 1-A.
- 2- Compressão, quando o pistão começa a subir do PMI em direção ao PMS, a medida que o mesmo sobe para a parte superior do cilindro, a mistura de ar mais combustível vai sendo comprimida no interior do cilindro, as válvulas estão na posição fechada, vedando a parte interna do cilindro, fazendo com que todo o volume aspirado no tempo anterior agora esteja pressurizado na câmara de combustão, ver Figura 1-B.
- 3- Explosão, neste processo a mistura comprimida na câmara de combustão recebe uma centelha ou faísca da vela, o pistão é forçado a descer empurrado pela expansão dos gases da explosão, com isso, o pistão se desloca do PMS para o PMI, ver Figura 1-C, mantendo ainda as válvulas do cabeçote fechadas. Sendo este processo considerado o principal tempo, pois é neste tempo que o motor

gera força motriz e torque que será transmitido ao virabrequim por meio de rotação.

- 4- Exaustão, quando ocorre a expulsão dos gases resultantes da queima para fora do motor. Tem-se a abertura da válvula de escape e o pistão começa a subir empurrando a mistura queimada em direção dos dutos do cabeçote e coletor de escape. Quando o pistão alcança o PMS os gases que se encontravam dentro do cilindro foram expulsos, ver Figura 1-D.

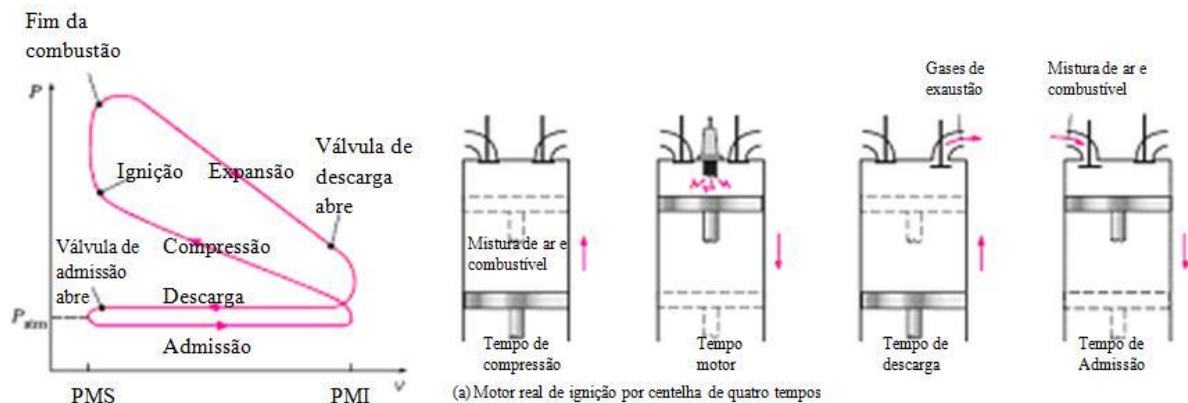


Figura 1 - Ciclo real dos motores de ignição por centelha seus diagramas P-V

Fonte: Çengel e Boles, 2006

2.1.2. Motores de Combustão Interna de Ignição por Compressão

Nos motores diesel, apenas o ar é comprimido durante o tempo de compressão, eliminando a possibilidade de auto-ignição. Portanto, os motores do ciclo diesel podem ser desenvolvidos para operarem a taxas de compressão muito mais altas, em geral entre 12 e 24.

O combustível é injetado a alta pressão no tempo de ignição um pouco antes do pistão atingir o ponto morto superior (PMS). Devido a alta temperatura do ar proveniente da alta pressão no interior do cilindro no processo de compressão, o combustível se inflama na câmara de combustão (PENIDO FILHO, 1996).

O processo de combustão 2-3 da Figura 2, nos motores do ciclo Diesel ocorre em um intervalo mais longo. Devido que a injeção de combustível começa quando o pistão se aproxima do PMS e continua durante a primeira parte do tempo de expansão. Devido a essa duração maior, o processo de combustão do ciclo Diesel ideal é considerado como um processo de fornecimento de calor à pressão constante,

diferenciando do processo de combustão do ciclo Otto que é fornecimento de calor a volume constante.

No funcionamento de um MCI a diesel de quatro tempos são realizados os seguintes processos:

- 1-2 Compressão isentrópica
- 2-3 Fornecimento de calor a pressão constante
- 3-4 Expansão isentrópica
- 4-1 Rejeição de calor a volume constante

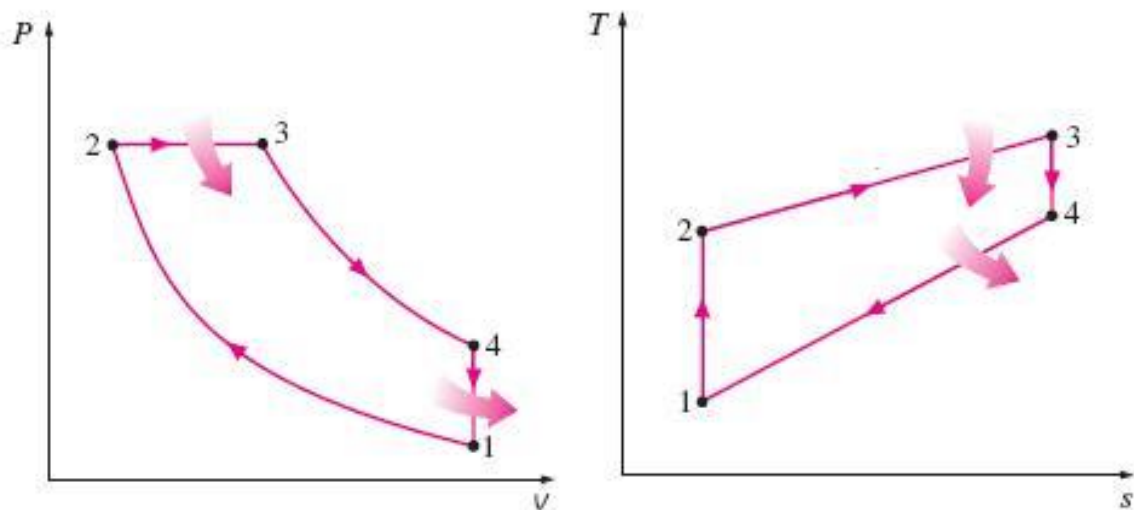


Figura 2 - Diagrama P-V e T-S do Ciclo Diesel

Fonte: Çengel e Boles, 2006

2.1.3. Motores de Combustão Interna Ciclo Dual

O ciclo Dual é um ciclo ideal que considera que a adição de calor ocorre em duas etapas. Na primeira etapa, a adição de calor ocorre instantaneamente enquanto o pistão encontra-se no PMS. Na segunda etapa a adição de calor ocorre durante um processo à pressão constante, quando o pistão se desloca do PMS para o PMI. O ciclo Dual é mostrado nos diagramas $p-v$ e $T-s$ das Figuras 3 e 4 respectivamente. O ciclo consiste em cinco processos internamente reversíveis em série.

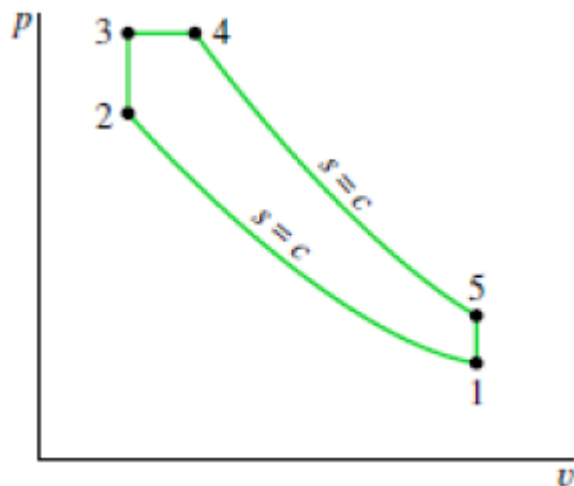


Figura 3 – Diagrama P-V do ciclo dual

Fonte: Moran e shapiro, 2002

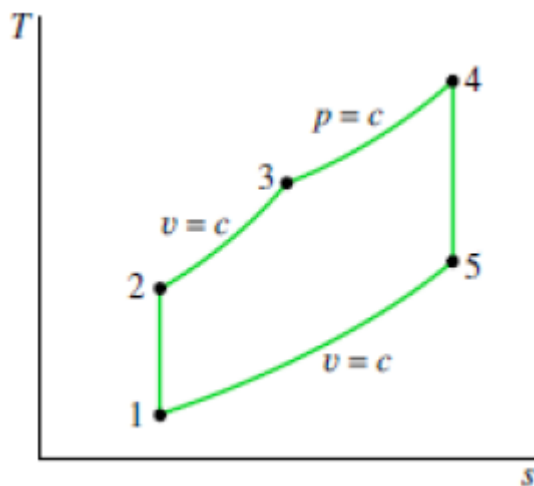


Figura 4 – Diagrama T-S do ciclo dual

Fonte: Moran e shapiro, 2002

Segue abaixo uma breve descrição de cada um dos cinco processos:

1-2 Compressão isentrópica do ar W12 conforme o pistão se move do PMI para o PMS.

2-3 Adição de calor a volume constante para o ar Q23 a partir de uma fonte externa enquanto o pistão está no PMS.

3-4 Adição de calor a pressão constante para o ar Q34 a partir de uma fonte externa e inicia o curso de potência;

4-5 Expansão isoentrópica do ar W45 conforme o pistão se move para o PMI.
e parte final do curso de potência;

5-1 Rejeição de calor a volume constante do ar Q51 enquanto o pistão está no PMI.

2.2. Combustíveis Alternativos Para Motores ICO

2.2.1. Etanol

O etanol é uma substância pura, composta por um único tipo de molécula (C_2H_5OH); o álcool etílico hidratado combustível (AEHC) diferencia-se do anidro (AEAC) por possuir em torno de 4% em volume de água na sua composição. O etanol anidro é utilizado para a formação da gasolina C, pois assim evita a separação de fases dada pela presença da água. No Brasil, utiliza-se o etanol da cana-de-açúcar, ao contrário de outros países que produzem o álcool etílico a partir do milho (Estados Unidos da América) ou beterraba e trigo (países da Europa).

Segundo a resolução ANP N° 7, de 9.2.2011, o etanol combustível no Brasil é destinado aos motores de ciclo Otto. É especificado sob a forma de álcool etílico anidro combustível, que é destinado ao distribuidor para ser misturado à gasolina tipo A para a formação da gasolina tipo C, e de álcool etílico hidratado combustível, que é destinado para a venda ao consumidor final nos postos revendedores

O etanol é um composto leve, fácil de ser obtido e que se mistura facilmente com água e com a grande maioria dos líquidos de baixo peso molecular. Ele é altamente inflamável, podendo entrar em combustão, se submetido a uma fonte de calor, a partir de 13 °C.

O álcool possui um poder calorífico menor que o da gasolina e diesel, o que significa que ele gera menos energia e rende menos kilometragem por litros. Sua densidade é menor que a da água e maior que a da gasolina, e seu PH é praticamente neutro.

As moléculas dos álcoois são solúveis tanto em substâncias polares como apolares, a miscibilidade do álcool acontece devido a existência de polaridade e apolaridade em sua molécula, ou seja, o álcool é solúvel em água como também em gasolina, como exemplo.

Dentre todos os álcoois, o etanol é o mais comum de ser obtido. A composição em massa de sua molécula é de 52.24 % de Carbono, 13.13 % de Hidrogênio e 34.73 % de Oxigênio.

O poder calorífico do etanol combustível comum (etanol hidratado) é de 5,380 Kilocalorias por litro (Kcal/l). Esse valor corresponde a aproximadamente 70% do poder calorífico da gasolina, calculado em 8,325 Kcal/l. É por isso que, em média, o litro do etanol faz 70% da distância que o litro da gasolina percorre, pois a energia contida em 1 litro da gasolina é 30% maior.

Um dos fatores para o menor poder calorífico do etanol é a pouca quantidade de hidrogênio (átomo com maior poder calorífico que existe) em sua cadeia e a presença do oxigênio (que tem baixo poder calorífico). Em geral, quanto maior a proporção de hidrogênio no combustível maior é seu poder calorífico.

A partir da temperatura de 13 °C, o etanol começa a emitir vapores que, em contato com outras fontes de calor, possibilita que ele entre em combustão. Essa marca é chamada de ponto de fulgor, o que não significa que ele necessariamente pegue fogo nesse ponto, apenas indica que há chances de isso acontecer caso um agente externo reaja sobre ele. Já seu ponto de auto-ignição, temperatura mínima para que a combustão ocorra mesmo sem o contato direto com uma fonte de calor, é de 363 °C.

Pelo seu baixo ponto de fulgor, o álcool é considerado uma substância inflamável, que são aquelas com ponto de fulgor menor que 70 °C. Por isso que, quando armazenado, ele traz a letra "F" em sua embalagem, acompanhada pelo desenho de uma chama. Entre os combustíveis mais comuns, apenas a gasolina tem ponto de fulgor menor que o etanol, sendo o dela de – 40 °C, enquanto o diesel e o biodiesel possuem pontos de, respectivamente, 62 °C e 130 °C.

Tabela 1 - Especificações do EAC, EHC e EHCP

Característica	Unidade	Limite			Método	
		EAC	EHC	EHCP	NBR	ASTM/EN/ISO
Aspecto	-	Límpido e Isento de Impurezas (LII)			Visual	
Cor	-				Visual	
Acidez total, máx. (em miligramas de ácido acético)	mg/L	30			9866 16047	ISO 17315

Condutividade elétrica, máx.	µS/m	300			10547	ISO 17308
Massa específica a 20°C.	kg/m3	791,5 máx.	805,2 a 811,2	799,7 a 802,8	5992 15639	D4052
Teor alcoólico ⁷	% massa	99,3 mín.	92,5 a 94,6	95,5 a 96,5	5992 15639	-
Potencial hidrogeniônico (pH)	-	-	6,0 a 8,0		10891	-
Teor de etanol, mín.	% volume	98,0	94,5	96,3	16041	D5501
Teor de água, máx. ¹⁰	% massa	0,7	7,5	4,5	15531 15888	E203 E1064
Teor de metanol, máx. ¹⁰	% volume	0,5			16041	
Resíduo por evaporação, máx.	mg/100 mL	5			8644	-
Teor de hidrocarbonetos, máx. ¹²	% volume	3			13993	-
Teor de cloreto, máx.	mg/kg	1			10894	D7328 D7319
Teor de sulfato, máx.	mg/kg	4			10894	D7328 D7319
Teor de ferro, máx. ¹⁵	mg/kg	5			11331	-
Teor de sódio, máx. ¹⁵	mg/kg	2			10422	-
Teor de cobre, máx.	mg/kg	0,07	-		11331	-
Teor de enxofre, máx.	mg/kg	Anotar			-	D5453 EN 15485 EN 15486 EN 15837

Tabela 2 - Características do EHC que deverão estar presentes no boletim de conformidade emitido pelo distribuidor de etanol¹

Característica	Unidade	Limite		Método	
			EHCP2	NBR	ASTM/EN
Aspecto ³				Visual	
Cor				Visual	

Condutividade elétrica, máx. ⁶				10547 ISO 17308
Massa específica a 20 °C			796,2 a 802,8	5992 15639 D4052
Teor alcoólico ^{8, 9}			95,5 a 97,7	5992 15639
	EHC			10891 -
-	Límpido e Isento de Impurezas (LII)			8644 -
-	5	3		13993 -
µS/m	300	1		10894 D7328 D7319
kg/m ³	802,9 a 811,2	94,5	96,3	16041 D5501
% massa	92,5 a 95,4	7,5	4,5	15531 15888 E203 E106411
-	6,0 a 8,0	0,5		16041
mg/100 mL	5			

Tabela 3 - Especificação do corante a ser adicionado ao EAC

Característica	Especificação	Método
Estado físico	Líquido	Visual
Família química - Color index	Solvent Red 19 ou Solvent Red 164	-
	Solvent Yellow 174 ou Solvent Yellow 175	-
Cor	Laranja	Visual
Absorvância a 420 nm	0,150 a 0,190	
Absorvância a 530 nm	0,100 a 0,135	
Solubilidade	Totalmente solúvel em etanol anidro combustível e insolúvel em água na concentração de 15 mg/L	

(*) Republicada por ter saído no DOU de 16/04/2015, Seção 1, páginas 46 a 49, com incorreção no original.

Fonte: Resolução ANP N° 19, de 15 de abril de 2015

2.2.2. Gás Natural

O Gás Natural é um combustível fóssil que se encontra na natureza, normalmente em reservatórios profundos no subsolo, associado ou não ao petróleo. Assim como o petróleo, ele resulta da degradação da matéria orgânica, fósseis de animais e plantas pré-históricas, sendo retirado da terra através de perfurações. Inodoro, incolor e de queima mais limpa que os demais combustíveis, o Gás Natural é resultado da combinação de hidrocarbonetos gasosos, nas condições normais atmosféricas de pressão e temperatura, contendo, principalmente, metano e etano.

O Gás Natural é uma fonte de energia moderna, utilizada em países de primeiro mundo. No Brasil, o uso vem crescendo, com uma evolução rápida e constante. São inúmeras as razões e vantagens para optar por ele.

O GNV (Gás Natural Veicular) tem sido muito utilizado como combustível para veículos. Além de ser mais barato do que o álcool e a gasolina, o GNV gera um baixo índice de poluentes atmosféricos em comparação aos combustíveis fósseis. Portanto é considerado uma fonte de energia limpa.

A composição comercial do gás natural é variada e depende da composição do gás natural bruto, do mercado atendido, do uso final e do produto gás que se deseja. Apesar desta variabilidade da composição, são parâmetros fundamentais que determinam a especificação comercial do gás natural o seu teor de enxofre total, o teor de gás sulfídrico, o teor de gás carbônico, o teor de gases inertes, o ponto de orvalho da água, o ponto de orvalho dos hidrocarbonetos e o poder calorífico.

Apresenta-se à seguir as normas para a especificação do Gás Natural a ser comercializado no Brasil, de origem interna e externa, igualmente aplicáveis às fases de produção, de transporte e de distribuição desse produto, determinadas pela Agência Nacional do Petróleo, Resolução ANP nº 16 de 17/06/2008. O Gás Natural deverá atender à especificações apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Especificação para o Gás Natural Comercializado no Brasil

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE (2) (3)	MÉTODO
----------------	---------	----------------	--------

Norte		Nordeste	Centro- Oeste, Sudeste e Sul	NBR	ASTM D	ISO	
Poder calorífico superior (4)	kJ/ m³	34.000 a 38.400	35.000 a 43.000	15213	3588	6976	
	kWh/m³	9,47 a 10,67	9,72 a 11,94				
Índice de Wobbe (5)	kJ/m³	40.500 a 45.000	46.500 a 53.500	15213	--	6976	
Número de metano, mín. (6)		anotar (3) (Célula alterada pela Resolução ANP nº 7, de 16.04.2010, DOU 19.04.2010)	65	--	--	15403	
Metano, mín.	% mol.	68,0	85,0	14903	1945	6974	
Etano, máx.	% mol.	12,0	12,0	14903	1945	6974	
Propano, máx.	% mol.	3,0	6,0	14903	1945	6974	
Butanos e mais pesados, máx.	% mol.	1,5	3,0	14903	1945	6974	
Oxigênio, máx. (7)	% mol.	0,8	0,5	14903	1945	6974	
Inertes (N2+CO2), máx.	% mol.	18,0	8,0	6,0	14903	1945	6974
CO2, máx.	% mol.	3,0	14903	1945	6974		
Enxofre Total, máx. (8)	mg/m3	70	--	5504	6326-3		
							6326-5
							19739
Gás Sulfídrico (H2S), máx.	mg/m3	10	13	10	--	5504	6326-3

						6228	
Ponto de orvalho de água a 1atm, máx. (9)	°C	-39	-39	-45	--	5454	6327
							10101-2
							10101-3
							11541
Ponto de orvalho de hidrocarbonetos a 4,5 MPa, máx. (10)	°C	15	15	0	--	--	6570
Mercúrio, máx. (11)	µg/m³	anotar			--	--	6978-1
							6978-2

Observações:

- (1) O gás natural não deve conter traços visíveis de partículas sólidas ou líquidas.
- (2) Os limites especificados são valores referidos a 293,15K (20°C) e 101,325kPa (1atm) em base seca, exceto os pontos de orvalho de hidrocarbonetos e de água.
- (3) A aplicação veicular do gás natural de Urucu se destina exclusivamente a veículos dotados de motores ou sistemas de conversão de gás natural veicular que atendam à legislação ambiental específica. O revendedor deverá afixar em local visível de seu estabelecimento comercial o seguinte aviso: "GÁS NATURAL VEICULAR DE URUCU - EXCLUSIVO PARA VEÍCULOS ADAPTADOS AO SEU USO". (Redação dada à nota pela Resolução ANP nº 7, de 16.04.2010, DOU 19.04.2010)
- (4) O poder calorífico de referência de substância pura empregado neste Regulamento Técnico encontrase sob condições de temperatura e pressão equivalentes a 293,15K, 101,325 kPa, respectivamente em base seca.
- (5) O índice de Wobbe é calculado empregando o poder calorífico superior em base seca. Quando o método ASTM D 3588 for aplicado para a obtenção do poder calorífico superior, o índice de Wobbe deverá ser determinado de acordo com a seguinte fórmula:

Fonte: Agência Nacional do Petróleo – ANP, Resolução ANP nº 16 de 17/06/2008

Além de obedecer aos índices da Tabela 4, o produto deve estar sempre livre de poeira, água condensada, odores objetáveis, gomas, elementos formadores de goma, glicóis, hidrocarbonetos condensáveis, compostos aromáticos, metanol ou outros elementos sólidos ou líquidos que possam interferir com a operação dos sistemas de transporte e distribuição e à utilização pelos consumidores.

O gás natural pode ser transportado sem odorização, exceto quando requerido por normas de segurança aplicáveis, porém, é obrigatória a presença de odorante na distribuição.

A determinação das características do produto são feitas mediante o emprego de normas da American Society for Testing and Materials (ASTM) e da International Organization for Standardization (ISO), segundo os Métodos de Ensaio listados à seguir:

ASTM D 1945 - Standard Test Method for Analysis of Natural Gas by Gas Chromatography;

ASTM D 3588 Calculating Heat Value, Compressibility Factor, and Relative Density (Specific Gravity) of Gaseous Fuels;

ASTM D 5454 - Standard Test Method Water Vapor Content of Gaseous Fuels Using Electronic Moisture Analyzers;

ASTM D 5504 - Standard Test Method for Determination of Sulfur Compounds in Natural Gas and Gaseous Fuels by Gas Chromatography and Chemiluminescence;

ISO 6326 - Natural Gas - Determination of Sulfur Compounds, Parts 1 to 5;

ISO 6974 - Natural Gas - Determination of Hydrogen, Inert Gases and Hydrocarbons up to C8 - Gas Chromatography Method;

Para adquirir as características comerciais desejadas o gás natural bruto passa por tratamento em uma Unidade de Processamento de Gás Natural – UPGN, que efetua a retirada de impurezas e a separação dos hidrocarbonetos pesados.

2.2.3. Óleo Diesel

O óleo diesel é um combustível fóssil, derivado do petróleo, muito utilizado em motores de caminhões, tratores, locomotivas, automóveis de passeio, máquinas de grande porte e embarcações. O óleo diesel é formado basicamente por hidrocarbonetos. Possui também em sua composição, em pequena quantidade, oxigênio, nitrogênio e enxofre.

As propriedades fluidodinâmicas de um combustível, importantes no que diz respeito ao funcionamento de motores de injeção por compressão (motores diesel), são a viscosidade e a densidade. Tais propriedades exercem grande influência na circulação e injeção do combustível. Afortunadamente, as propriedades fluidodinâmicas do biodiesel, independentemente de sua origem, assemelham-se as do óleo diesel mineral, significando que não é necessária qualquer adaptação ou regulação no sistema de injeção dos motores.

Tabela 5 - Especificação do óleo Diesel

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE			MÉTODO
		S10	S500	S1800 não rodoviário	
Aspecto (1)		LII (2)			Visual
Cor		(3)	Vermelho (4)	(5)	Visual
Cor ASTM, máx.		3,0			NBR 14483 ASTM D6045 ASTM D1500
Massa Específica (20°C)	kg/m³	817,8 a 865,0	817,8 a 875,5	822,4 a 886,0	NBR 7148 NBR 14065 ASTM D1298 ASTM D4052
Viscosidade a 40°C	mm²/s	1,9 a 4,1	2,0 a 5,0		NBR 10441 ASTM D445
Teor de Biodiesel, % vol.	% volume	8,0 a 30,0			NBR 15568 EN 14078 ASTM D7371 (6)
Enxofre, máx.	mg/kg	10	-		ASTM D5453 ASTM D2622 ASTM D7039 ASTM D7220 (6)
		-	500	1800	ASTM D2622 ASTM D5453 ASTM D7039
Destilação / 10%	°C	180	Anotar		NBR 9619 (6)

vol., máx. (7)					ASTM D86 (6) ASTM D1160
Destilação / 50% vol. (7)	°C	245,0 a 295,0	245,0 a 310,0		
Destilação / 85% vol.	°C	Anotar			
Destilação / 90% vol.	°C	Anotar			
Destilação / 95% vol.	°C	Anotar			
Ponto de fulgor, °C, mín.	°C	38			NBR 7974 NBR 14598 ASTM D56 ASTM D93 ASTM D3828
Ponto de entupimento de filtro a frio, máx.	°C	(8)			NBR 14747 ASTM D6371
Resíduo de Carbono - 10% amostra, máx.	%massa	0,25			NBR 14318 ASTM D524
Cinzas, máx.	%massa	0,01			NBR 9842 ASTM D482
Corrosividade ao cobre		1			NBR 14359 ASTM D130
Teor de água, máx.	mg/kg	200	500		ASTM D6304 EN ISO 12937
Água e sedimentos, máx.	% vol	-	0,05		ASTM D2709
Estabilidade à oxidação, mín.	h	20			EN15751
Contaminação total, máx. (9)	mg/kg	24	Anotar		EN12662
Número de Acidez, máx.	mg KOH/g	0,3			NBR 14248 ASTM D664
Condutividade elétrica, mín. (10)	pS/m	25	25	Anotar	ASTM D2624 ASTM D4308
Número de cetano ou número de cetano derivado (NCD), mín.	-	48	46	42	ASTM D613 ASTM D6890 ASTM D7170

(1) Em caso de disputa ou para efeito de fiscalização, nas autuações por não conformidade no Aspecto, deverão ser realizadas as análises de teor de água e

contaminação total, para o óleo diesel B8 a B30 (S10) e teor de água e sedimentos para o óleo diesel B8 a B30 (S500), e somente teor de água no óleo diesel B8 a B30 (S1800). O Aspecto será considerado não conforme caso ao menos um desses parâmetros esteja fora de especificação.

- (2) Límpido e isento de impurezas, com anotação da temperatura de ensaio.
- (3) Incolor a amarelada, podendo apresentar-se ligeiramente alterada para as tonalidades marrom e alaranjada devido à coloração do biodiesel.
- (4) O corante vermelho deverá ser especificado conforme a Resolução ANP nº 50/2013, ou outra que venha substituí-la.
- (5) Coloração de amarelo a alaranjado, podendo apresentar-se ligeiramente alterado para a tonalidade marrom devido à coloração do biodiesel.
- (6) Aplicável somente para mistura de óleo diesel A com até 20% de biodiesel.
- (7) Utilizar o método ASTM D1160 para óleo diesel B21 a B30, sendo neste caso os limites "anotar" para as temperaturas de 10% e 50% recuperados.
- (8) Limites conforme Tabela V.
- (9) Deverá ser utilizada somente a versão da norma de 1998 ou 2008 (EN 12662:1998 ou EN 12662:2008)
- (10) Limite requerido no momento e na temperatura do carregamento/bombeio do combustível pelo distribuidor.

Tabela 6 - Ponto de Entupimento de Filtro a Frio

UNIDADE S DA FEDERAÇ ÃO	LIMITE MÁXIMO, °C											
	JA N	FE V	MA R	AB R	MA I	JU N	JU L	AG O	SE T	OU T	NO V	DE Z
SP - MG - MS	12	12	12	7	3	3	3	3	7	9	9	12
GO/DF - MT - ES - RJ	12	12	12	10	5	5	5	8	8	10	12	12
PR - SC - RS	10	10	7	7	0	0	0	0	0	7	7	10

Fonte: www.anp.gov.br - Resolução ANP nº 50, de 23.12.2013 - DOU 24.12.2013

2.2.4. Biodiesel

A principal matéria-prima utilizada na fabricação do biodiesel são óleos de origem vegetal. Entre os vários métodos existentes para obtenção do biodiesel, destacam-se o craqueamento e a transesterificação de óleos vegetais, sendo este, atualmente o melhor método de escolha, pois as características físicas dos ésteres de ácidos graxos são muito próximas do diesel. Além disso, trata-se de um processo simples que reduz a massa molecular para um terço em relação aos triglicerídeos, como também reduz a viscosidade e aumenta a volatilidade, se tornando um melhor combustível, colaborando diretamente a favor da vida útil do motor (Geris, 2007).

O biodiesel representa uma diminuição na poluição de duas formas. Durante sua reação de combustão a quantidade de dióxido de carbono liberada pela queima é menor em relação aos combustíveis fósseis. Além de ser uma fonte de energia renovável.

Segundo a PETROBRÁS (2007), o biodiesel constitui combustível biodegradável derivado de fontes renováveis, que substitui total ou parcialmente o óleo diesel de fonte mineral nos motores de combustão interna de ciclo diesel, como os de caminhões, tratores, ônibus e outros veículos, ou em motores estacionários (como os utilizados para geração de energia elétrica). O biodiesel pode ser empregado como combustível puro ou em mistura com o diesel de mineral. Sua utilização está associada à substituição de combustíveis fósseis em motores de ignição por compressão, sem haver a necessidade de nenhuma modificação no motor. Esse biocombustível tem as características necessárias para substituir o óleo diesel, com a vantagem de ser praticamente livre de compostos orgânicos nocivos ao ser humano. O biodiesel apresenta vantagens sobre os combustíveis derivados do petróleo por ser praticamente isento de enxofre e de compostos aromáticos; ter ponto de fulgor mais elevado e propiciar menor emissão de material particulado e maior biodegradabilidade, além de ser proveniente de fontes renováveis (SANTOS et al., 2007a). Seu caráter renovável está apoiado no fato da matéria-prima se originar de práticas agrícolas

As características físicas e químicas do biodiesel variam de acordo com a matéria-prima utilizada para a obtenção do combustível. No entanto, conforme a Resolução ANP N° 51 DE 25/11/2015, o biodiesel puro (B100) a ser misturado ao diesel de petróleo na proporção de 7% deve atender às especificações descritas na norma para qualquer fonte de matéria-prima. Assim, os limites de alguns parâmetros físico-químicos a atender estão listados na Tabela 7. Quando enquadrados nesses

limites, o biodiesel poderá ser usado na maioria dos motores modernos sem modificação e manterá o mecanismo, a durabilidade e a confiabilidade do motor.

Tabela 7 – Especificação de Biodiesel

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE	MÉTODO		
			ABNT NBR	ASTM D	EN/ISO
Aspecto	-	LII (1) (2)	-	-	-
Massa específica a 20° C	kg/m³	850 a 900	7148 14065	1298 405 2	EN ISO 3675 EN ISO 12185
Viscosidade Cinemática a 40°C	mm²/s	3,0 a 6,0	10441	445	EN ISO 3104
Teor de água, máx.	mg/kg	200,0 (3)	-	6304	EN ISO 12937
(Redação dada pela Resolução ANP Nº 51 DE 25/11/2015):					
Contaminação Total, máx. (13)	mg/kg	24	15995	-	EN12662 (5)
Ponto de fulgor, mín. (4)	°C	100,0	14598	93	EN ISO 3679
Teor de éster, mín	% massa	96,5	15764	-	EN 14103 (5)
Cinzas sulfatadas, máx. (6)	% massa	0,020	6294	874	EN ISO 3987
Enxofre total, máx.	mg/kg	10	15867	5453	EN ISO 20846 EN ISO 20884
Sódio + Potássio, máx.	mg/kg	5	15554 15555 15553 15556	-	EN 14108 (5) EN 14109 (5) EN 14538 (5)
Cálcio + Magnésio, máx.	mg/kg	5	15553 15556	-	EN 14538 (5)
Fósforo, máx. (7)	mg/kg	10	15553	4951	EN 14107 (5) EN 16294 (5)

Corrosividade ao cobre, 3h a 50°C, máx. (6)	-	1	14359	130	EN ISO 2160
Número Cetano (6)	-	Anotar	-	613 6890 (8)	EN ISO 5165
Ponto de entupimento de filtro a frio, máx.	°C	(9)	14747	6371	EN 116
Índice de acidez, máx.	mg KOH/g	0,50	14448 -	664 -	EN 14104 (5)
Glicerol livre, máx.	% massa	0,02	15771 15908 (5) -	6584 (5) -	EN 14105 (5) EN 14106 (5)
Glicerol total, máx. (10)	% massa	0,25	15344 15908 (5)	6584 (5) -	EN 14105 (5)
Monoacilglicerol, máx.	% massa	0,7	15342 (5) 15344 15908 (5)	6584 (5)	EN 14105 (5)
Diacilglicerol, máx.	% massa	0,20	15342 (5) 15344 15908 (5)	6584 (5)	EN 14105 (5)
Triacilglicerol, máx.	% massa	0,20	15342 (5) 15344 15908 (5)	6584 (5)	EN 14105 (5)
Metanol e/ou Etanol, máx.	% massa	0,20	15343	-	EN 14110 (5)
Índice de lodo	g/100g	Anotar	-	-	EN 14111 (5)
Estabilidade à oxidação a 110°C, mín. (11)	h	6 (12)	-	-	EN 14112 (5) EN 15751 (5)

Nota:

(1) Límpido e isento de impurezas, com anotação da temperatura de ensaio. Em caso de disputa, o produto só poderá ser considerado como não especificado no Aspecto, caso os parâmetros teor de água e/ou contaminação total estejam não conformes.

(2) Para efeito de fiscalização, nas autuações por não conformidade no Aspecto, deverão ser realizadas as análises de teor de água e contaminação total. O produto será reprovado

caso pelo menos um desses dois últimos parâmetros esteja fora de especificação.

(3) Para efeito de fiscalização, nas autuações por não conformidade, será admitida variação de +50 mg/kg no limite do teor de água no biodiesel para o produtor e de +150 mg/kg para o distribuidor.

(4) Quando a análise de ponto de fulgor resultar em valor superior a 130°C, fica dispensada a análise de teor de metanol ou etanol.

(5) Os métodos referenciados demandam validação para os materiais graxos não previstos no método e rota de produção etílica.

(6) Estas características devem ser analisadas em conjunto com as demais constantes da Tabela de Especificação a cada trimestre civil. Os resultados devem ser enviados à ANP pelo Produtor de biodiesel, tomando uma amostra do biodiesel comercializado no trimestre e, em caso de neste período haver mudança de tipo de material graxo, o Produtor deverá analisar número de amostras correspondente ao número de tipos de materiais graxos utilizados.

(7) Em caso de disputa, deve ser utilizado o método EN 14107 como referência.

(8) O método ASTM D6890 poderá ser utilizado como método alternativo para determinação do número de cetano.

(9) Limites conforme Tabela II. Para os estados não contemplados na tabela o ponto de entupimento a frio permanecerá 19°C.

(10) Poderá ser determinado pelos métodos ABNT NBR 15908, ABNT NBR 15344, ASTM D6584 ou EN14105, sendo aplicável o limite de 0,25% em massa. Para biodiesel oriundo de material graxo predominantemente láurico, deve ser utilizado método ABNT NBR 15908 ou ABNT NBR 15344, sendo aplicável o limite de 0,30% em massa.

(11) O limite estabelecido deverá ser atendido em toda a cadeia de abastecimento do combustível.

(12) A estabilidade à oxidação a 110°C terá seu limite mínimo de 8 horas, a partir de 1º de novembro de 2014.

(13) Deverá ser utilizada somente a versão da norma de 1998 ou 2008 (EN 12662:1998 ou EN 12662:2008) (Nota acrescentada pela Resolução ANP Nº 51 DE 25/11/2015).

Tabela 8 – Ponto de Entupimento de Filtro a Frio

UNIDADES DA FEDERAÇÃO	LIMITE MÁXIMO,°C											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
SP - MG - MS	14	14	14	12	8	8	8	8	8	12	14	14

GO/DF - MT - ES - RJ	14	14	14	14	10	10	10	10	10	14	14	14
PR - SC - RS	14	14	14	10	5	5	5	5	5	10	14	14

Fonte: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, RESOLUÇÃO ANP Nº 51 DE 25/11/2015

2.3. Poder Calorífico de um Combustível

De acordo com D. Vlassov (2008), uma característica mais importante de qualquer combustível é o poder calorífico que é a quantidade do calor que se liberta durante a combustão completa do combustível. O poder calorífico é medido em Joule (J, kJ, MJ) por quilograma de combustíveis líquidos ou por metro cúbico de combustíveis gasosos, sendo em MJ/kg ou MJ/m³.

O valor do poder calorífico depende de composição química do combustível. O poder calorífico é determinado de forma experimental nos combustíveis líquidos em um banco especial que se chama bomba calorimétrica, ver Figura 5, em que o combustível é queimado no meio do oxigênio puro, de combustíveis gasosos em um calorímetro.



Figura 5 – Bomba calorimétrica

Fonte: <http://labcontrol.com.br/tag/combustiveis/>

Na bomba calorimétrica é determinado o chamado poder calorífico superior (PCS). O valor do poder calorífico superior inclui um calor de condensação do vapor da água formado pela combustão do hidrogênio e pela umidade contida no combustível.

Em motores de combustão interna (MCI) gases de escape têm a temperatura maior de que a de condensação do vapor da água e por isso este calor de condensação não se aproveita. Em cálculos térmicos dos MCI é usado poder calorífico inferior (PCI), que não inclui o calor de condensação de vapor da água. Entre poder calorífico superior e inferior há uma correlação $PCI = PCS - 225H - 25W$ [kJ/kg]

Onde: H e W - porcentagem mássica do hidrogênio e da umidade em combustível líquido.

A maioria dos motores consomem combustíveis líquidos provenientes do petróleo, isto é: gasolina, óleo diesel (simplesmente diesel), óleo combustível para motores Diesel de grande potência que são usados em viaturas pesadas e navios e, também, é usado o álcool etílico. Nos últimos tempos, cada vez mais, são usados combustíveis gasosos, gás comprimido (GNV) e liquefeito (GLP) que são mais ecológicos. Um combustível líquido derivado do petróleo, pela massa é composto em geral de carbono C, hidrogênio - H e pequenas quantidades de enxofre - S, oxigênio - O e nitrogênio - N.

Dependendo das condições de determinação, o poder calorífico de um combustível pode apresentar diferentes valores.

- Poder Calorífico a Pressão Constante (PCp) - É a quantidade de calor liberada na combustão que se processa a pressão constante (ambiente aberto).

- Poder Calorífico a Volume Constante (PCv) - É a quantidade de calor liberada na combustão que se processa a volume constante (ambiente fechado). O valor do poder calorífico a volume constante é maior que o valor do poder calorífico a pressão constante para um mesmo combustível. A razão de tal fato é que parte do calor gerado no processo a pressão constante, é consumido no trabalho de expansão dos gases submetidos à pressão reinante.

Em função do estado físico que se encontra a água presente nos gases da combustão, define-se ainda:

- Poder Calorífico Superior (PCS) - Obtido quando resfriamos os gases da combustão até a temperatura ambiente. Dessa forma, ocorre a condensação do vapor de água, e a quantidade de calor medida inclui o calor de condensação da água.

- Poder Calorífico Inferior (PCI) - Pode ser obtido deduzindo-se do valor do poder calorífico superior, a quantidade de calor relativa à condensação do vapor de água, segundo equação demonstrada anteriormente.

Quando se fornece o valor do poder calorífico de um combustível devem ser especificadas as condições de determinação, se a pressão ou volume constante, e ainda as condições do combustível, se seco ou úmido, se considerado com ou sem cinzas. Geralmente os dados tabelados (que expressam as condições práticas) referem-se a pressão constante (1 atm) e temperatura de entrada do combustível e saída dos gases igual a 18°C (ou 25 °C).

A diversas formas de se obter o poder calorífico dos combustíveis, dentre elas temos:

Determinação experimental do Poder Calorífico: A medida experimental em laboratório é feita com o auxílio de calorímetros, que são aparelhos adiabáticos (que não trocam calor com o ambiente), dentro dos quais promove-se a combustão de uma massa conhecida do combustível. O calor gerado é transferido para uma massa de água, cuja temperatura sofre elevação. A partir dos dados experimentais coletados, calcula-se o poder calorífico. Para combustíveis sólidos e líquidos, utiliza-se o calorímetro (ou "bomba calorimétrica") de Berthelot-Mahler. Para combustíveis gasosos utiliza-se o calorímetro de Junke's.

Cálculo do Poder Calorífico: O cálculo estimativo do poder calorífico de um combustível pode ser feito com base na composição do combustível, e nos valores dos calores de combustão das frações combustíveis. Outra forma é com o auxílio de fórmulas empíricas..

Cálculo pelos Calores de Combustão: Conhecida a composição em massa (ou em quantidade de matéria) do combustível, determina-se a quantidade de calor desprendida na combustão de cada fração. A soma dessas quantidades de calor será o valor estimativo do poder calorífico. Importante: No cálculo do poder calorífico inferior de combustíveis que contenham umidade e/ou água combinada, deve ser descontada do valor encontrado, a quantidade de calor necessária para vaporizar a massa de água combinada e/ou a massa de umidade.

2.4. Analisador de Potência

O dinamômetro é um equipamento usado para medir rotação, torque e potência de um motor de combustão interna em suas diversas condições de funcionamento. Os testes de motores são realizados em laboratório de ensaios, utilizando um dinamômetro, que é um instrumento de absorção de energia e que é capaz de aplicar uma carga controlada no motor que está sendo testado.

Ajustes e modificações em um veículo, normalmente requerem testes em dinamômetros, de forma a verificar sua viabilidade técnica da nova configuração. Seu princípio de funcionamento consiste em aplicar uma força de atrito, no virabrequim do motor através do uso de um freio, buscando um equilíbrio dinâmico (BRUNETTI, 2012).

O freio dinamométrico consiste basicamente de um rotor ligado a um motor e um estator apoiado em mancais de rolamento e travado sobre uma célula de carga, colocada no extremo de um braço de comprimento b , provocando uma força na célula de carga conforme figura 6, resultando em um binário de valor $b \times F$ que multiplicado pela rotação do motor teremos como resultado a potência do mesmo (MARTINS, 2013).

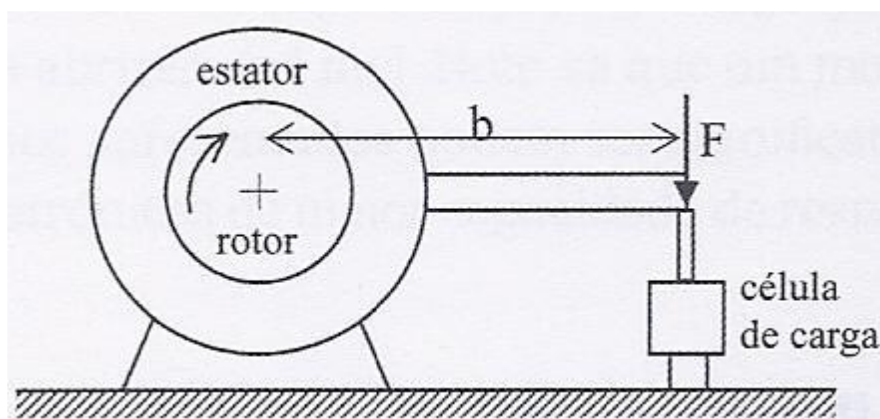


Figura 6 – Esquema de um freio dinamométrico.

Fonte: Martins, 2013

Os dinamômetros diferenciam-se apenas com relação ao tipo de frenagem, sendo os mais comuns os elétricos e os hidráulicos. Onde o dinamômetro hidráulico utiliza o atrito de cisalhamento da água contra a carcaça, em quanto os elétricos utiliza os esforços do campo elétricos ou magnéticos.

2.4.1. Dinamômetro Hidráulico

Os dinamômetros hidráulicos são ferramentas de controle e instrumentação que medem a potência de um motor usando uma célula cheia com um líquido para aumentar a sua carga. São amplamente utilizados em aplicações para medição em veículos automotores porque a capacidade de determinação das medidas do torque, velocidade de rotação máxima e absorção de potência máxima é importante e valiosa para a indústria automobilística, assim como para os consumidores finais.

O dinamômetro hidráulico consiste em um rotor solidário a um eixo, a ser acoplado ao motor, que é freado pela força de pressão da água. O seu princípio de funcionamento está ilustrado na Figura 7.

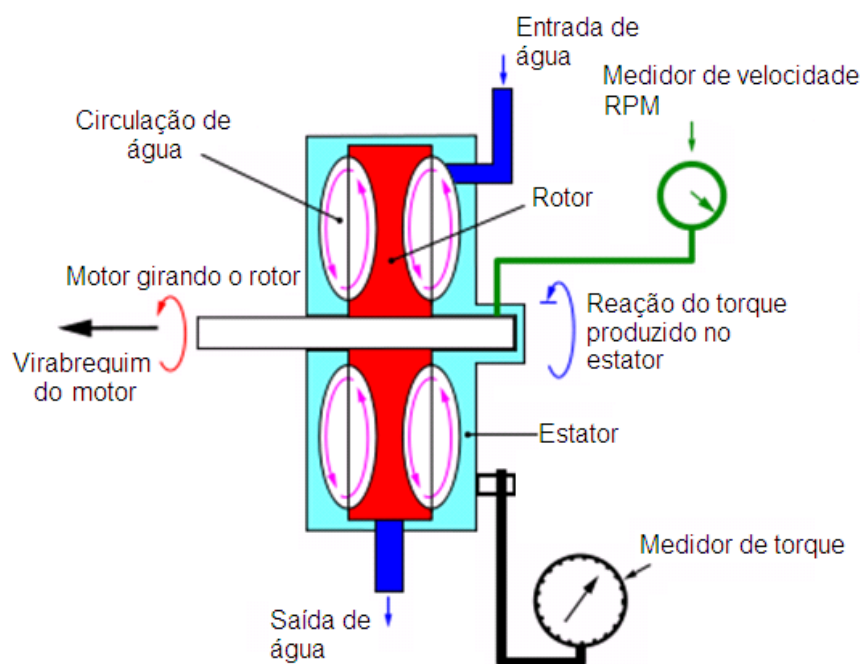


Figura 7 – Ilustração do funcionamento do dinamômetro hidráulico

Fonte: Autor

Conforme ilustra a Figura 7, observa-se que o dinamômetro possui um rotor aletado que gira no interior de uma carcaça (estator). O rotor succiona água para dentro do estator, sendo que quanto maior a restrição da saída de água, maior a carga imposta ao eixo. Na ocorrência do equilíbrio dinâmico, dispositivos do dinamômetro medem o torque no eixo e sua rotação, calculando valores de potência.

É preciso alguns critérios para a escolha ideal do dinamômetro, alguns deles: finalidade, preço, faixa de potência, rotação máxima, torque e sentido de rotação.

2.4.2. Dinamômetro Elétrico

Há vários tipos de dinamômetros elétricos, mas em todos a energia absorvida é transformada em energia elétrica, que pode ser retirada do freio como eletricidade ou como calor resultante das perdas eletromagnéticas (correntes de Foucault).

Os dinamômetros de corrente contínua, são basicamente um motor de corrente contínua que funciona como gerador, sendo a carga controlada eletronicamente. Uma vantagem adicional deste tipo de dinamômetro é que o motor pode ser posto em movimento pelo freio (para arranque ou para medição das perdas mecânicas). Geralmente estão limitados a uma velocidade baixa e tem bastante inércia. Semelhantes a estes são os dinamômetros de corrente alternada (motor assíncrono ou de indução), que tem as mesmas vantagens, mas apresentam menos inércia e agüentam maiores velocidades. O controle é conseguido pela variação da frequência da corrente de ativação (inversor de frequência).

Os dinamômetros de corrente de Foucault, Figura 8, são em geral os mais utilizados. O seu funcionamento assenta na indução eletromagnética pelo rotor em movimento (excitado eletricamente), que produz correntes de Foucault dissipadas na forma de perdas resistivas no estator. A variação da corrente de excitação produz as variações de carga do freio. O calor dissipado no estator tem de ser retirado por água (processo mais frequente) ou por ar (como nos freios elétricos dos veículos pesados).



Figura 8 – Dinamômetro de corrente foucault

Fonte: Autor

Os dinamômetros elétricos absorvem a energia disponível no eixo do motor e a transforma em energia elétrica (FERGUNSON, 2001). Isso é possível devido ao acionamento de resistências elétricas pelo dinamômetro. As resistências são denominadas cargas. A potência do motor é indicada pela potência que está sendo dissipada pelas resistências. O gerador elétrico acionando um conjunto de resistores é um exemplo de dinamômetro elétrico.

2.5. Emissões dos Principais Gases Poluentes em Motores ICO

2.5.1. Hidrocarbonetos

Em motores de combustão interna com ignição por compressão são duas as causas principais da presença de combustível não queimado na exaustão (HEYWOOD, 1988):

- o combustível misturado entre o início da sua injeção e o início da combustão é mais pobre que o limite de mistura pobre adequado para o motor.
- a não ocorrência de mistura do combustível com o ar devido à baixa velocidade do combustível ao sair dos furos do bico injetor.

Segundo Degobert (1995), a emissão de hidrocarbonetos não queimados, ou substâncias orgânicas de um modo geral, resulta da combustão incompleta de hidrocarbonetos. Contrariamente ao CO e NO_x, estes formados em uma fase homogênea a elevada temperatura, os hidrocarbonetos resultam a partir de efeitos heterogêneos na mistura e na vizinhança com as paredes do cilindro, consequentemente a uma baixa temperatura. Hidrocarbonetos não queimados incluem uma ampla variedade de hidrocarbonetos os quais são perigosos a saúde ou possuem diferentes reatividades nas conversões químicas troposféricas.

Em particular, HC não queimados contém uma ampla proporção de metano, o qual é inerte neste sentido. Enquanto compostos carbonílicos são considerados para somente um pequeno percentual de emissões de HC em motores de ignição por centelha, aldeídos podem ter uma variação acima de 10% nas emissões de HC em

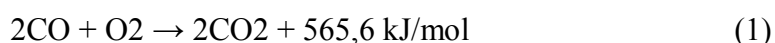
motores diesel a entre estas aldeídos e formaldeídos representam 20% do total de compostos carbonílicos.

Mesmo com excesso de oxigênio, característica esta da combustão diesel, condições heterogêneas da câmara de combustão podem causar reações de oxidação incompletas e não queimadas ou parcialmente hidrocarbonetos oxidados na exaustão em adição ao CO. Alguns destes componentes são responsáveis pelo odor típico da exaustão diesel. Todos os parâmetros que melhoram a exploração do oxigênio na câmara de combustão (tal como o escoamento turbulento da mistura) ou aumento das temperaturas da combustão podem reduzir as emissões de CO e HC. (BASSHUYSEN; SCHAFFER, 2004, p.601).

2.5.2. Monóxido de Carbono

A combustão de hidrocarbonetos é um processo de oxi-redução, ocorrendo a oxidação do carbono e a redução do hidrogênio, com liberação de energia e formação de novos compostos, sendo o principal elemento o dióxido de carbono (CO₂). Quando a quantidade de oxigênio presente na mistura ar/combustível é insuficiente para promover a completa oxidação do carbono presente na câmara de combustão ocorre a formação de monóxido de carbono (CO).

Segundo Majewski e Khair (2006, p.124), a uma elevada temperatura ou através de um catalisador oxidante, o monóxido de carbono pode ser oxidado pelo oxigênio e formar dióxido de carbono. A Eq. 1 demonstra a reação citada:



Esta reação produz elevado efeito térmico, sendo que no caso de gases de exaustão ricos em CO, podem causar um significativo aumento na temperatura do gás em reatores catalíticos projetados para oxidar o CO. Uma oxidação adiabática de 1% de CO no fluxo de gases de exaustão aumentam a temperatura do gás em aproximadamente 100 °C.

Atualmente as emissões de CO dos novos motores diesel são relativamente baixas, estando em uma faixa entre 10 a 500 ppm. (MAJEWSKI; KHAIR, 2006). Heywood (1988) afirma que a formação de monóxido de carbono (CO) em motores de combustão interna depende primariamente da razão de equivalência da mistura combustível/ar (ϕ). Misturas ricas fazem com que falte O₂ para formação do CO₂.

Todas as outras variáveis ocasionam variações menos relevantes. Em motores multicilindros, se a metade dos cilindros roda com uma mistura pobre e a outra metade com uma mistura rica, então os cilindros com mistura pobre produzem muito menos CO do que os cilindros com mistura rica. A média de emissão do CO no motor corresponderia a sua razão de equivalência de mistura mais rica do que média.

Assim, a chave para minimizar a emissão de CO é minimizar o tempo que o motor opera com a mistura rica e a utilização de um sistema de indução que minimize a variação de ϕ de cilindro para cilindro e de ciclo a ciclo. Motores Diesel operam com misturas mais pobres, conseqüentemente, suas emissões de monóxido de carbono são mais baixas e, geralmente, não são consideradas um problema.

A necessidade de enriquecimento da mistura quando o motor está frio faz com que as emissões de monóxido de carbono durante o aquecimento do motor sejam muito maiores em relação à operação do motor completamente aquecido. Os maiores índices de potência são obtidos com a mistura levemente rica, que apresenta níveis de emissões de NO e CO elevados. Nas misturas ligeiramente pobres o nível de CO se reduz, mas o nível de NO é relativamente alto. Com o objetivo de reduzir o nível de NO, usa-se a recirculação dos gases residuais, afetando a qualidade da combustão.

2.5.3. Óxidos de Nitrogênio

Os óxidos de nitrogênio (NO_x) apresentam-se nos gases de exaustão como óxido nítrico (NO) e dióxido de nitrogênio (NO_2). Os elementos óxido nítrico (NO) e dióxido de nitrogênio (NO_2) são usualmente agrupados como NO_x . Porém, a produção de óxido nítrico é predominante em motores com ignição por centelha (HEYWOOD, 1988), correspondendo a cerca de 90% do total de NO_x . Assim neste trabalho, os resultados apresentados para NO serão representativos para NO_x . Heywood (1988) menciona que o NO_x forma-se nas regiões de altas temperaturas atrás da frente de chama. Quanto maior a temperatura, maior a sua formação.

A taxa de formação dos óxidos de nitrogênio depende da temperatura atingida pelos gases durante a combustão, normalmente acima de 1600°C , e do tempo de permanência dos gases à alta temperatura. Os NO_x formam-se através de reações químicas envolvendo moléculas de nitrogênio (N_2) e oxigênio (O_2) dissociadas do ar de combustão. Para a formação de óxido nítrico na combustão de misturas próximas da

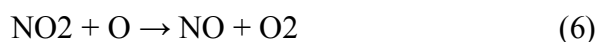
estequiométrica são comumente aceitas as reações do mecanismo de Zeldovich (HEYWOOD, 1988):



Nos motores de combustão interna com ignição por compressão o dióxido de nitrogênio pode atingir valores entre 10 e 30% do total de NOX presente na exaustão. Um mecanismo plausível de formação de NO₂ é (HEYWOOD, 1988):



O dióxido de nitrogênio formado na região da chama é rapidamente convertido em óxido nítrico pela reação descrita na Eq. 6



As exceções são os casos em que o NO₂ é rapidamente misturado com combustível frio, o que ocorre em motores de combustão interna com ignição por compressão operando com baixa carga, condição necessária para que as regiões com temperaturas menores que a da chama sejam difusas. O óxido nítrico se forma na queima de uma mistura de combustível típico e ar a partir da temperatura de 426,85 °C (700 K) e pressão de 15 atm (15,2 bar). A taxa de formação de óxido nítrico cresce com o aumento da temperatura e da pressão.

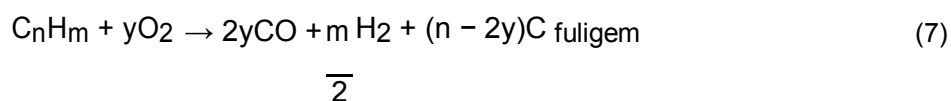
2.5.4. Material Particulado

Segundo a EPA (U.S. Environmental Protection Agency), o material particulado é definido como qualquer massa coletada em um filtro posicionado na exaustão de um veículo após um determinado ciclo de operação, com a temperatura de exaustão mantida a 52 °C. O material particulado produzido por um motor diesel consiste, basicamente, de

aglomerados de núcleos de carbono e de hidrocarbonetos, SO₃ ou ácido sulfúrico, e água adsorvidos ou condensados sobre esses núcleos carbônicos.

O material particulado forma-se em altas temperaturas, em regiões da câmara de combustão ricas em combustível, a partir de gotículas individuais.

É importante salientar que o material particulado apresenta uma estrutura complexa, que depende de vários fatores como o tipo de motor, carga, modo de condução do veículo, qualidade do óleo lubrificante do motor e combustível utilizado. De acordo com Heywood (1988) a formação do material particulado pode ocorrer pela reação:



A ocorrência desta equação é possível somente quando o fator $(n - 2y) > 0$, ou seja, quando a razão entre a quantidade de carbono e a quantidade de oxigênio é maior que a unidade. Em outros termos, a oxigenação do combustível na câmara de combustão, que nos motores de combustão interna com ignição por compressão ocorre com a sua pulverização efetuada pelo injetor, é fator preponderante para a redução da formação de fuligem. O processo de formação da fuligem é influenciado pela chama, pelo fluxo do combustível e, sobretudo, pelo tipo de hidrocarboneto, pressão e temperatura.

CAPÍTULO III

INJEÇÃO ELETRÔNICA DE COMBUSTÍVEL EM SISTEMAS DUAL FUEL

3.1. SISTEMA COMMON RAIL DE CONTROLE DA INJEÇÃO ELETRÔNICA DE COMBUSTÍVEL

3.1.1. Introdução

O motor Diesel foi inventado em 1893 pelo Engenheiro Rudolf Diesel. Este tipo de motor é utilizado quase na totalidade em veículos rodoviários pesados (tratores, caminhões, ônibus), em navios e em algumas instalações estacionárias de potência e locomotivas, mas o seu uso em automóveis é agora muito importante, a mercê das importantes evoluções que nele tem sido realizada atualmente, principalmente no controle da injeção eletrônica de combustível.

Assim como os motores ciclo Otto, que no final da década de 1980 início da de 1990 tiveram o sistema de alimentação por carburador substituído pelo sistema de injeção eletrônica, os motores ciclo Diesel passam pelo mesmo processo. Desta forma, a bomba injetora passa a dar lugar a sistemas de injeção eletrônica diesel, como o Common Rail.

O sistema Common Rail de injeção eletrônica Diesel é um dos mais modernos e flexíveis sistemas de injeção existentes, preenchendo todos os requisitos de níveis de emissões e ao mesmo tempo oferecendo baixo nível de ruído e consumo, alto conforto e potência ao usuário.

3.1.2. Principais Componentes Do Sistema Common Rail De Injeção Eletrônica

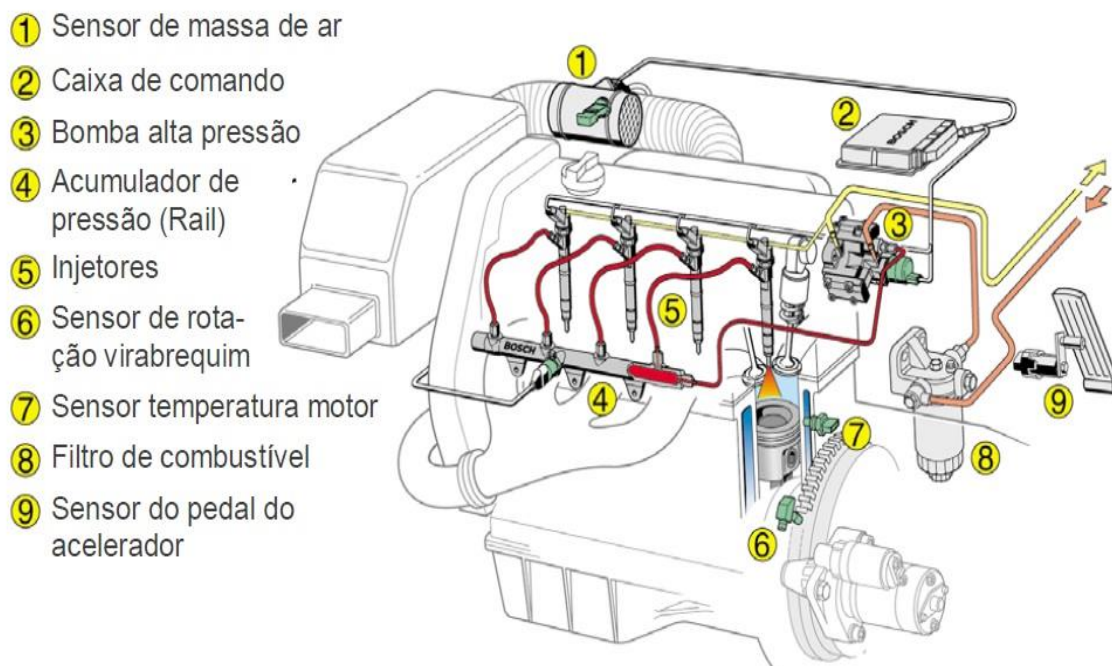


Figura 9 – Vista esquemática dos componentes de um sistema de injeção Common Rail

Fonte: Manual Bosch

1 – Sensor de massa de ar: Sensor responsável por informar, à unidade de comando, a quantidade de ar que está sendo admitida pelo motor. O sensor MAF informa, diretamente, a massa de ar admitida fornecendo um sinal de tensão variável cujo valor depende da massa de ar que o atravessa. Os sensores mais utilizados nos sistemas atuais são **Sensor de pressão e temperatura do ar de admissão (MAP)** este sensor é do tipo duplo e informa o ECM sobre a temperatura e a pressão do ar admitido para calcular a massa de ar utilizada na combustão através da densidade X volume. Está localizado entre o filtro de ar e o coletor de admissão.

2 - Caixa de Comando: A caixa de comando é responsável por receber dados dos sensores (p. ex. sensores de rotação, temperaturas da água, óleo e ar, pressão do turbo e do combustível no rail, posição do pedal do acelerador, etc.), avaliar os dados baseado nos mapas de comando previamente programados em sua memória e desta forma comandar o sistema de injeção, definindo a quantidade injetada, a pressão do sistema, entre outros parâmetros.

3 - Bomba alta pressão: Bomba radial de três pistões que recebe o óleo diesel do circuito de baixa pressão e o comprime a pressões de até 1350bar, sendo que o fluxo de óleo é definido pela válvula reguladora de fluxo (ZME), que é comandada pela caixa de comando. Este modelo de bomba é lubrificado com o próprio óleo diesel do sistema.

4 - Rail ou acumulador de pressão: É basicamente um tubo forjado com conexões roscadas, sendo que uma é a conexão de óleo que vêm da bomba CP e as restantes (a quantidade de conexões depende do número de cilindros do motor) são para a transferência de óleo pressurizado para os injetores. Além disso o rail é equipado com o sensor de pressão do sistema e com uma válvula de segurança que limita a pressão no sistema.

5 - Injetores common rail: Os injetores recebem o óleo diesel pressurizado do rail e o injetam na câmara de combustão do motor. A injeção é feita comandada pela caixa de comando, que aciona eletricamente o magneto (solenóide) de cada injetor. Como a pressão está sempre disponível no Rail, a injeção pode ser feita de maneira bastante flexível, podendo-se realizar até duas pré-injeções, uma injeção principal e duas pós injeções. Isto é importante para a diminuição do ruído do motor, otimização da combustão e redução de emissões gasosas.

6 – Sensor de rotação de virabrequim: O sensor de rotação da árvore de manivelas é do tipo indutivo e está posicionado na carcaça do volante. O sinal do sensor é responsável pela leitura da rotação do motor e da posição exata dos pistões nos cilindros. A informação é usada pela ECM para cálculo do ângulo de início de injeção.

7 – Sensor de temperatura do motor: Do tipo NTC (Coeficiente Negativo de Temperatura), informa a temperatura de arrefecimento do motor. O ECM utiliza esses parâmetros para corrigir do valor de injeção de combustível, ângulo de início de injeção e rotação de marcha lenta.

8 – Filtro de combustível: Tem por finalidade proteger o sistema de injeção, retendo as impurezas existentes de várias maneiras, onde estas contaminações podem obstruir os sistemas de injeção, dando origem a deterioração e problemas no motor. Também são utilizados para outras funções que satisfazem exigências como: aquecimento do combustível, regulação da pressão, detecção do nível de água, etc.

9 – Sensor do pedal de acelerador: É do tipo potenciômetro rotativo e o sinal tem como objetivo calcular a rotação em marcha-lenta, ângulo de início de injeção e tempo de injeção em aceleração e desaceleração. A movimentação do pedal aciona um

contato deslizante que, através de uma trilha de resistência elétrica, gera o sinal de acordo com a situação solicitada.

Ainda fazem parte do sistema e que não estão expressados na Figura 12, alguns outros componentes com importante funcionalidade como:

Válvula Reguladora de Pressão de combustível – A válvula reguladora de pressão de combustível tem a função de ajustar a pressão do combustível em função da rotação e carga do motor, dentro da faixa previamente definida no mapeamento de funções do ECM. Dessa forma, a bomba de alta pressão gera somente pressão que será requerida no momento, diminuindo a potencia que será consumida no funcionamento da bomba e também o aquecimento do combustível. Esta válvula esta localizada na bomba de alta pressão.

Sensor de Pressão Atmosférica – esta localizada no ECM e tem a função de monitorar a pressão ambiente, indicando a altitude geográfica onde se encontra o veículo. Conforme o sinal enviado pelo sensor, a ECM faz a correção do débito de injeção.

Sensor de Posição do Motor (Comando de Válvulas) – O sensor de posição do motor está posicionado na tampa de válvulas e tem como objetivo ler o sinal provocado por um ressalto na árvore do comando, sincronizando a injeção através da localização do 1º cilindro que está em combustão e a posição do pistão no cilindro. A informação é utilizada pela ECM para calculo de sincronismo de injeção.

Sensor de pressão do Rail – O sensor do tubo (Rail) monitora a pressão do combustível que chega ao sistema de alta pressão. O sensor é um elemento Piezo-Resistivo e um circuito integrado com compensação de temperatura; atua através de um diagrama deformado pela pressão do combustível. Com a mudança da pressão interna, a deformação do diafragma altera a resistência e os valores de sinal. Esses valores são utilizados pela ECM para regular a pressão de combustível no circuito de alta pressão.

Modulador do Turbocompressor – O modulador é uma válvula eletromagnética com a função de liberar ou bloquear a passagem de vácuo para a válvula waste-gate do Turbocompressor. Controlada pela ECM, a válvula ajusta, eletronicamente, a passagem de ar para a admissão do motor.

3.1.3. Princípio de Funcionamento Sistema Common Rail De Injeção Eletrônica

Partindo do sistema de alimentação de combustível para motor Diesel pela bomba injetora, observamos que a bomba desempenha praticamente todas as funções que determinam a quantidade de combustível e pressão necessária para a combustão, sendo que na maioria dos casos funciona de forma totalmente mecânica, fornecendo combustível ao motor através dos bicos injetores, que também de forma estritamente mecânica, sob ação da pressão, abre a passagem de uma determinada quantidade de combustível no momento que o cilindro necessitar de combustível.

No sistema Common Rail a configuração torna-se diferente. Os bicos injetores não estão ligados a uma bomba injetora através de um tubo para cada cilindro como no sistema mecânico, e sim acoplados a um único tubo ou galeria de combustível, semelhante aos sistemas de injeção multiponto para ciclo Otto. Daí o nome de Common Rail.

A alta pressão é gerada por uma bomba acoplada ao motor que fornece o combustível com a pressão necessária para o tubo e o injetor, que, apesar de abrir passagem ao combustível por pressão, isto só ocorre quando a unidade eletrônica de comando assim determinar através de sinal elétrico. Desta forma, a pressão de injeção de combustível pode variar independente da rotação do motor e da própria quantidade de combustível a ser fornecida para o motor nos seus diversos regimes de trabalho.

Assim podemos dizer que tanto a pressão como a quantidade de combustível são determinadas de forma independente pela unidade eletrônica de comando, onde, para cumprir as determinações, a unidade recebe informações de diversos sensores, cada um com sua determinada função. Portanto, o motor trabalha no melhor de seu desempenho, com consumo otimizado, baixas emissões de poluentes e baixo nível de ruído. Além disso, a eletrônica possibilita uma enorme gama de funções que podem, entre outras, proteger o motor no caso de pane durante a operação, ou no caso de alguma falha no próprio sistema de injeção. Nesta situação ocorre um alerta no painel de instrumentos, indicado por uma lâmpada de alerta, determinada “espia”.

A unidade de comando recebe diversas informações através dos sensores e, dependendo da necessidade aciona os atuadores, sendo os principais o regulador de pressão de combustível e o injetor, fazendo do sistema Common Rail o mais adequado para atender às exigências requeridas na aplicação de motores Diesel.

Partindo de pontos básicos, a unidade necessita de informações como a de rotação do motor, da massa de ar no qual o motor está admitindo em tal regime de funcionando, e no caso do motor diesel onde a injeção é diretamente na câmara de combustão, esta unidade necessita saber o momento do ponto morto superior do cilindro 1, para ter uma referência e acionar corretamente os bicos injetores em sequência. Também se faz necessário um sensor de pressão do combustível para o controle da pressão de combustível no tubo distribuidor ("rail"), nos diversos regimes de trabalho do motor. Além disso, é importante conhecer a posição do acelerador do veículo durante a condução pelo motorista (sensor do pedal do acelerador). Existem ainda outros sensores que trazem as condições momentâneas para que haja uma adequação do sistema de maneira precisa na forma de trabalho dos atuadores.

Com o tempo tem-se uma constante evolução dos sistemas, isso significa que foram sendo agregados outros componentes ou, como é de se esperar, foram aprimorados cada vez mais em suas tecnologias. Entre os objetivos desta constante evolução estão o de proporcionar ganho em economia, dirigibilidade, conforto, segurança, desempenho e, conseqüentemente, atender às normas de emissões que a cada período se tornam mais rigorosas, com redução dos limites para assegurar um meio ambiente mais limpo. Para isto é necessário sistemas que dão versatilidade na sua aplicação.

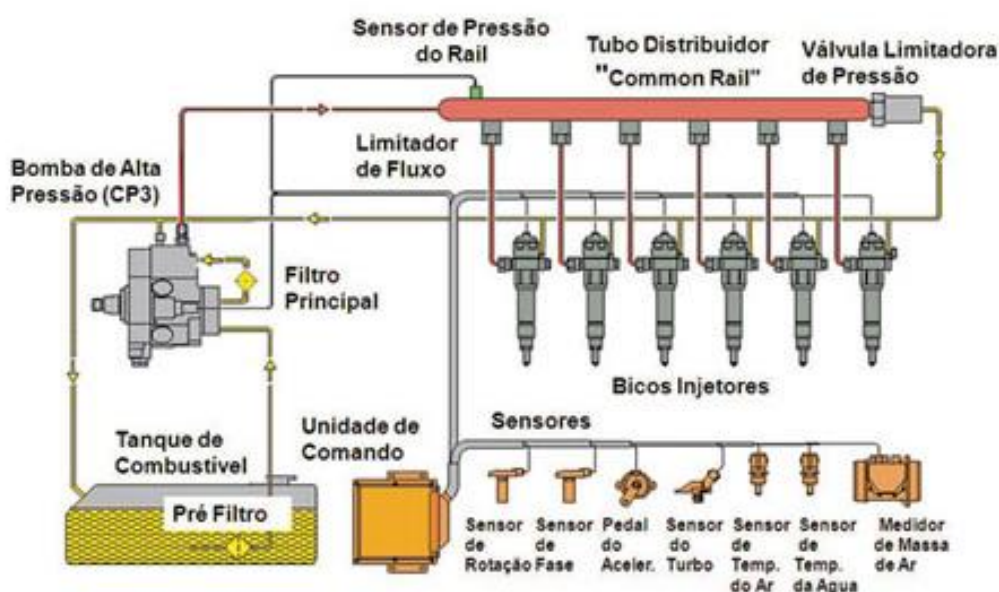


Figura 10 - Pode-se identificar os diversos componentes do sistema common rail

Fonte: Manual Bosch

CAPÍTULO IV

BANCADA EXPERIMENTAL

4.1. Motor MWM 4.07 TCE

Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizado o motor MWM 4.07 TCE, ver Figura 11, com o sistema de injeção eletrônica Common Rail. Instalado no laboratório do Instituto de Energia Renováveis (IES) na Universidade Federal da Paraíba (UFPB), acoplado a um dinamômetro elétrico dotado de todo sistema de aquisição de dados em tempo real.



Figura 11 - Motor MWM 4.07 TCE

Fonte: manual de operação MWM

Tabela 9 - Dados técnicos do motor MWM

Dados do Motor	4.07 TCE
----------------	----------

Aspiração	Turboalimentado Pós-Arrefecido
Tipo de Construção	4 tempos - Injeção Direta com Gerenciamento Eletrônico
Camisas	Secas e substituíveis
Cabeçote	Único, fluxo cruzado, c/ 2 dutos p/ admissão: espiral e tangencial
Quantidade de Cilindros	4 em linha
Válvulas de admissão / cil.	2
Válvulas de escape / cil.	1
Quantidade de válvulas	12
Diâmetro X Curso	93 X 103 mm
Cilindrada Unitária	0,700 litros
Cilindrada Total	2,8 litros
Primeiro Cilindro	Lado do Volante
Ordem de Ignição	1-3-4-2
Sentido de Rotação	Anti-Horário (Visto do Volante)
Peso Seco	198 kg
Taxa de Compressão	17,2 : 1
Pressão de Compressão	Valor Mínimo (medido na rotação mínima de 200 rpm e temperatura de funcionamento)
• motor novo	28 bar
• motor usado	23 bar
Folga de Válvulas	0,2 mm \pm 0,1

Tabela 10 - Dados técnicos do sistema de lubrificação do motor MWM TCE 4.07.

Sistema de Lubrificação	4.07TCE
Pressão de óleo (quente)	
• Marcha-lenta	0,7 bar
• Rotação Máxima	4,9 ba
Temperatura Normal do Óleo no Cáster	106 a 115 °C
Temperatura Máx. do Óleo no Cáster	125 °C
Volume de óleo	
• Máxima	8 litros (sem filtro)
• Rotação Máxima	5 litros (sem filtro)
Volume do Filtro	1,0 litro

Tabela 11- Dados técnicos do sistema de arrefecimento do motor MWM 4.07 TCE

Sistema de Arrefecimento	4.07 TCE
Volume de água (s/ radiador)	4,25 litros
Temperatura da água <ul style="list-style-type: none"> • Nominal • Máxima 	80 - 85 °C 110 °C
Válvulas termostáticas <ul style="list-style-type: none"> • Início de abertura • Abertura total • Curso mínimo 	79 °C ± 2 94 °C ± 2 8 mm
Diferença de temperatura entre entrada e saída do motor	7 °C
Proporção do aditivo	50% ± 10%

Tabela 12 - Dados técnicos do sistema de combustível do motor MWM 4.07 TCE.

Descrição	4 Cilindros
Restrição máxima de entrada de combustível (para bomba de engrenagens)	0,6 a 1,2 bar
Pressão da galeria (Rail)	350 a 1400 bar
Faixa de pressão de combustível na saída do filtro de combustível (na rotação de partida)	9,7 a 12,8 bar
Faixa de pressão de combustível na entrada do filtro de combustível (na rotação de funcionamento)	10,5 a 13 bar
Queda máxima de pressão no filtro de combustível	0,8 bar

Fonte: Manual MWM

4.2. Dinamômetro

O dinamômetro que se utiliza para os ensaios de teste de potencia e torque do motor é um dinamômetro LOGS elétrico de corrente de Foucaut com capacidade de 410 CV a 4000 RPM, que apresenta rápida resposta a variações de carga, boa robustez e efetuam varias medições em diversos regimes de funcionamento dentro da faixa de utilização do motor.



Figura 12 - Dinamômetro LOGS Elétrico Acoplado ao Motor MWM 4.07 TCE

Fonte: autor

4.2.1. Acoplamento motor dinamômetro

O acoplamento da marca Antares da linha AT aplicações convencionais, ver Figura 13, é um acoplamento flexível, o qual apresenta grande benefício de absorção de desalinhamento reduzindo o esforço entre o eixo do dinamômetro e o volante do motor. Além disso absorve choques mecânicos no início da rotação, e reduz os problemas de vibrações e ruídos.

Utiliza-se um acoplamento flexível versão especial com espaçador, que facilita a montagem e desmontagem do acoplamento, devido o espaço entre o volante do motor e o eixo do dinamômetro.

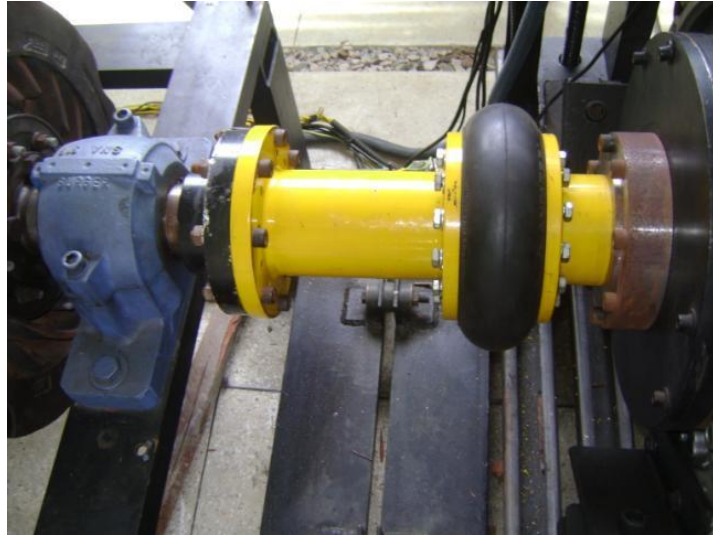


Figura 13 - Acoplamento Antaris AT versão especial com espaçador, acoplado entre o dinamômetro e motor MWM 4.07 TCE.

Fonte: Autor

4.2.2. Sistema de aquisição de dados do dinamômetro

O Sistema de aquisição de dados DinMon 3, que utiliza-se no LEME - UFPB apresenta as seguintes características:

- 32 entradas analógicas, sendo 16 com condicionadores de sinal para termopares
- 16 entradas genéricas;
- 1 entrada digital para medição de rotação;
- 2 saídas analógicas para controle de carga e servo acelerador;
- 1 porta de comunicação para microcomputador RS-232 ou USB, condicionador de sinal para sensor de rotação;
- 1 entrada para célula de carga;
- 1 entrada para o sensor de pressão do óleo;
- 1 entrada para o sensor de temperatura do ar;
- Sensores atmosféricos, pressão barométrica;

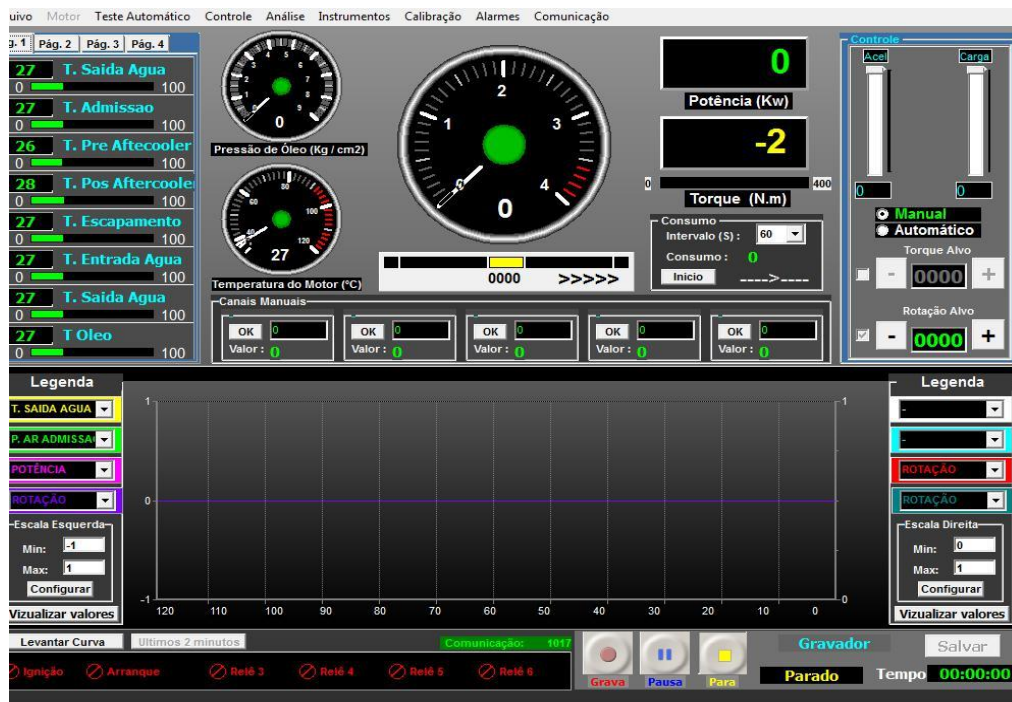


Figura 14 - Sistema de Aquisição de Dados do Dinamômetro LOGS

Fonte: Autor

4.3. Reservatórios de combustível

4.3.1. Reservatório do combustível óleo Diesel

Neste projeto de pesquisa utiliza-se um tanque de combustível de aço galvanizado com capacidade de 84 litros de óleo diesel, ver Figura 15, este modelo é utilizado no veículo F-4000 da marca Ford. No processo de medição de consumo de óleo diesel não era viável utilizar uma balança para pesar 84 litros de óleo diesel, então utilizamos um recipiente com capacidade de 2 litros de óleo e utilizamos uma balança da marca Balmak ELC-25 com capacidade de 25 kilogramas com uma precisão de 2 gramas. Foi necessário confeccionar um suporte para o reservatório de vidro transparente e com graduação, com isto poderemos verificar o consumo de óleo por volume e por massa que é o mais utilizado para esses fins.



Figura 15 - Reservatório de combustível óleo diesel

Fonte: Autor

4.3.2. Reservatório de GNV (cilindro GNV)

O cilindro de GNV deste projeto é da marca CILBRAS com capacidade de $29,20\text{dm}^3$ e peso de $42,10\text{kg}$, ver figura 16. Todos os cilindros que são comercializados para armazenar o GNV, necessitam ser certificados pela norma ISO 9001 e submetidos a diversos testes, obedecendo às mais rígidas exigências do mercado. O gás natural veicular é armazenado a uma pressão de 200 bar podendo variar de acordo com a tolerância que é de 10%. No sistema de medição do consumo do gás natural veicular, o cilindro de GNV é montado em um suporte para poder ser colocado em cima da balança a fim de facilitar o manuseio para medição.



Figura 16 – Balança e suporte do Reservatório de GNV (cilindro GNV)

Fonte: Autor

No processo de medição de consumo de GNV utiliza-se o sistema de medição baseado no consumo da massa do GNV e para tanto tem-se uma balança da marca digitron, ver figura 19, com as devidas características:

- Classe de exatidão III
- Aprovado pelo INMETRO conforme Portaria 236
- Display com 26 mm de altura (com 5 ou 6 dígitos)
- Divisão de Leitura: 50 gramas
- Célula de carga ICS em alumínio com grau de proteção IP68
- Alimentação de 85 a 250 Vca (Fonte Automática)
- Suporta até 8 células de 350 ohm ou 12 de 700 ohm
- Capacidade Programável
- Velocidade de leitura/tempo de estabilização configurável

- Filtro digital, contra vibrações, configurável em até 8 níveis
- Indicadores luminosos de zero, peso líquido e peso estável
- Detector de pico máximo
- Dimensões Indicador: 120mm, L:240mm, P: 70mm
- Grau de Proteção IP-65 (Módulo de Pesagem)

4.4. Redutor de pressão do gás natural veicular (GNV)

Os redutores de pressão estão calibrado para uma pressão de saída superior a pressão do coletor de admissão do motor, que pode variar entre 2 bar (200 kPa) e 2,5 bar (250 kPa) para motores turbinados. É um redutor de dois estágios de membrana, com compensação por vácuo. Para evitar a queda interna de pressão e o congelamento do GNV, os redutores possui internamente um trocador de calor, que utiliza a água do radiador do motor do veiculo como liquido de arrefecimento. Vem incorporada no corpo do redutor, uma eletroválvula de alta pressão que libera a entrada do gás natural que está armazenado em uma pressão máxima de 200 bar. Também possui válvula de segurança interna (LANDI RENZO, 2013).



Figura 17 - Redutor de pressão positiva

Fonte: Landi Renzo, 2013

4.5. Eletroválvulas de injeção do GNV

A galeria de injetores recebe o gás proveniente do filtro de alimentação. Os injetores quando são pilotados pela unidade de central eletrônica (UCE) libera o gás, e o mesmo chega ao coletor de admissão e ao motor. O Gás natural veicular proveniente do redutor, que passou por uma redução de pressão de uma entrada de até 200 bar de pressão para uma saída de 2 bar passa pelo filtro e vai alimenta o conjunto de injetores. Os injetores são acionado individualmente a liberar a passagem do GNV de acordo com comando do sistema de controle biodiesel-GNV .

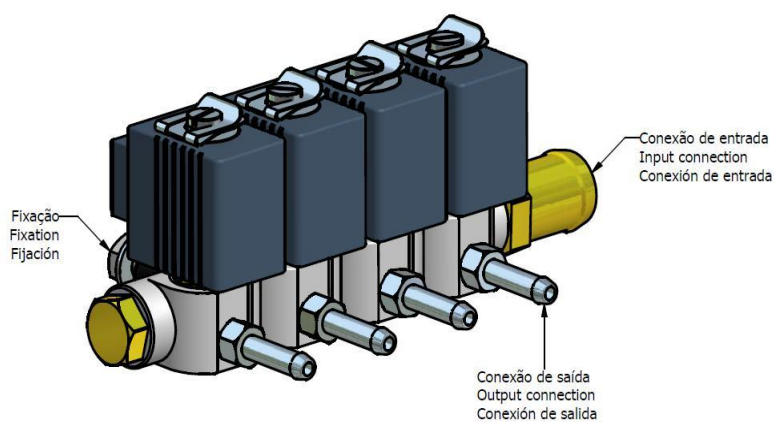


Figura 18 - Galeria de injetores

Fonte: Rodagás

Ao ser liberado, o GNV sai dos injetores e chega ao coletor de admissão e é admitido pelo motor. O conjunto de injetores pode ter 2, 3 ou 4 injetores, para cobrir a gama das possíveis aplicações. No conjunto de injetores é possível ser coletados sinais de pressão e temperatura do gás. O acionamento dos injetores é do tipo "peak and hold". Onde no desenvolvimento deste projeto foi utilizado um conjunto de 4 injetores da marca Landi Renzo que é apresentada na Figura 19 abaixo:



Figura 19 - Conjunto de injetores Landi Renzo Instalado no Motor MWM 4.07 TCE

Fonte: Autor

4.6. Sistema de controle Biodiesel-GNV (Placa de aquisição e microcontrolador)

Para conseguir injetar dois combustíveis na câmara de combustão do motor em estudo fez se necessário desenvolver um sistema para controlar o fluxo de óleo diesel/biodiesel e de gás natural veicular de tal forma que permita o uso simultâneo dos dois combustíveis. Nessa pesquisa houve uma atualização em relação ao sistema de controle Biodiesel-GNV utilizado na pesquisa de Santos, 2015.

Foi realizado uma atualização no sistema eletrônico substituindo a placa de aquisição e o microcontrolador PIC18F4520 responsável pelo processamento do controle do fluxo dos combustíveis por uma placa com microcontrolador PIC18F4550 da microchip a qual é mais compacta e permite maior capacidade de processamento, permitindo melhor controle sobre os tempos de injeção, onde os do óleo diesel ocorrem em micro segundos.

O microcontrolador PIC18F4550 utilizado na Placa de controle do Sistema Biodiesel-GNV tem as seguintes especificações:

- Chip: PIC18F4550
- Pinos: 40
- Memória de Programa (Flash): 32Kb
- Memória de Dados (RAM): 2Kb
- Memória EEPROM: 256 bytes
- Velocidade de Operação: até 48Mhz
- Portas I/O: 35
- Portas A/D: 13 (10-bit)
- Comparadores: 2
- Ampla faixa de tensão de Operação: 2,0V à 5,5V
- 20 tipos de interrupções
- Arquitetura RISC (set de instruções reduzidas)
- 31 níveis de STACK - Módulo CCP (Capture/Compare/PWM)
- Porta Paralela: 8 bits
- Timers: 1 (8-bit), 3 (16-bit)
- WDT (WatchDogTimer)
- Porta de Comunicação USB 2.0 (Full Speed)
- Comunicação UART, USART, SPI, I2C

Fez-se necessário o uso da instrumentação eletrônica e de alguns subsistemas eletrônicos:

- Sistema de aquisição de sinais;
- Sistema de controle diesel GNV
- Sistema de acionamento dos injetores diesel;
- Sistema de acionamento dos injetores GNV
- Modulo peak-hold dos injetores do GNV;

Cada subsistemas citado tem funções especifica no sistema de controle biodiesel-GNV conforme fluxograma da figura 20 abaixo:

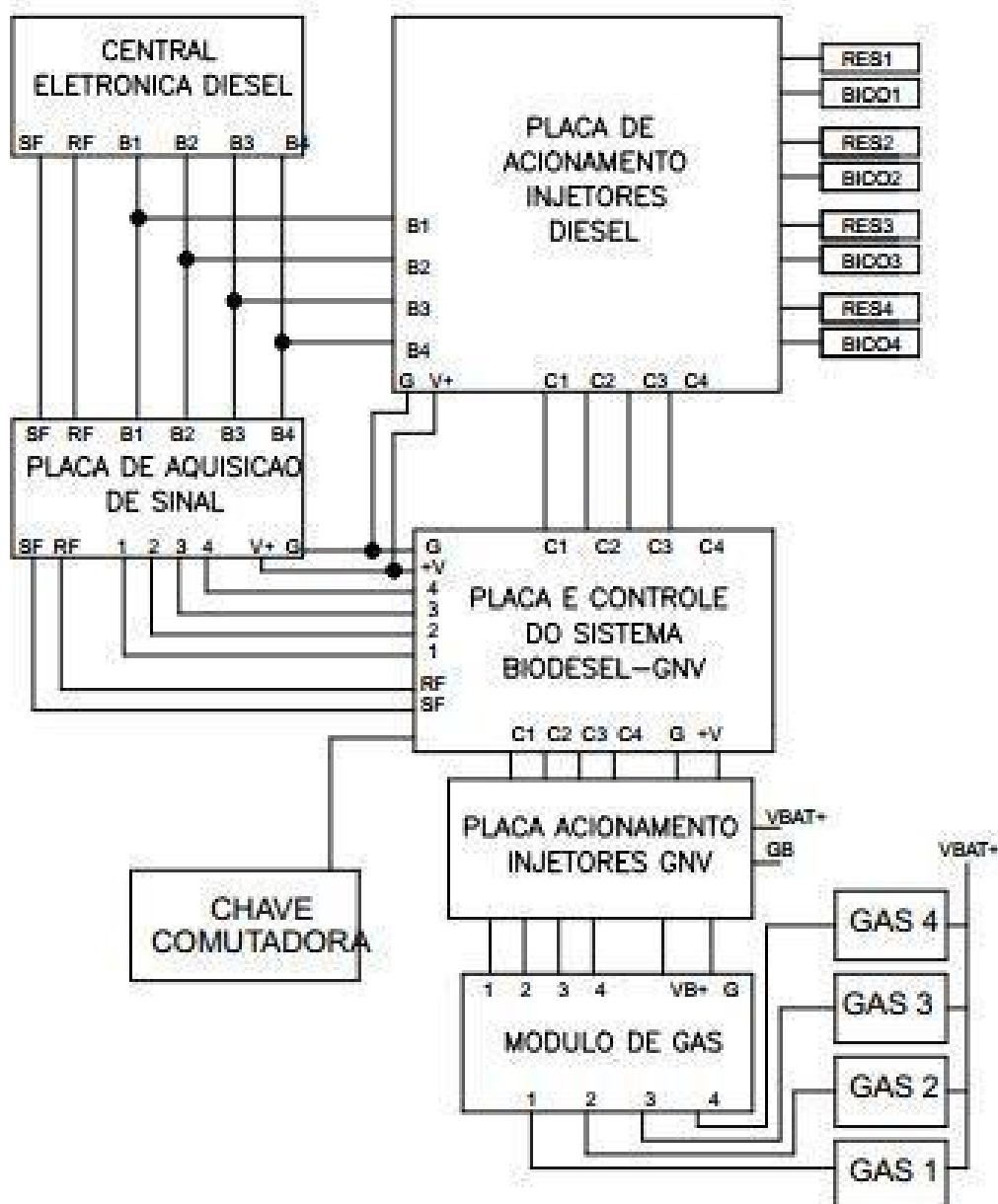


Figura 20 - Fluxograma do sistema biodiesel-GNV

Fonte: Santos, 2015

4.7. Scanner NAPRO PC TRUCK 5000

O PC-SCAN50000 USB é o scanner com tecnologia brasileira, que atende grande parte da frota nacional e importada. Desenvolvido para atender as necessidades dos mecânicos, funciona junto a um computador (PC ou Notebook).

Com as evoluções tecnológicas no mercado, a rápida comunicação USB associada a um computador, permite uma ótima velocidade de processamento dos

dados, o que traz uma rápida resposta dos sistemas analisados e atende aos diversos protocolos e sistemas.



Figura 21 - Scanner NAPRO PC TRUCK 5000

Fonte: www.napro.com.br

Principais funções:

- Consultar a memória de avarias (leitura do código de falhas)
- Limpar a memória de avarias
- Diagnóstico de sensores e elementos atuadores
- Regulagem básica
- Orientação ao mecânico na identificação de defeitos
- Modo Contínuo
- Leitura dinâmica de parâmetros do veículo, dependendo do tipo de injeção, permite ver na tela do computador uma série de valores ao mesmo tempo como Rotação do

Motor, Temperaturas do Líquido de Arrefecimento, Ar de admissão, Óleo e Combustível, Pressões do Combustível e Turbo, Posição Pedal do Acelerador, etc.

O PC-TRUCK5000 abrange vários protocolos de comunicação inclusive o CAN. Trabalha conectado em qualquer computador ou Notebook compatível com algumas características mínimas.

Composição:

- Cabo serial
- Maleta
- Adaptador serial
- Manual
- Conector ISO 9141
- Conector SAEJ 1587
- Conector SAEJ 1939
- Adaptador MB
- Cabo DTH 6P
- Cabo DTH 9P
- Cabo GMC 16
- Cabo Volvo 8P
- Cabo Volvo 9P
- CPC 16
- Cabo D-CAN VW TRUCK 5000
- Cabo V-CAN VW TRUCK 5000

4.8. Osciloscópio InfiniiVision MSO-X 2012A

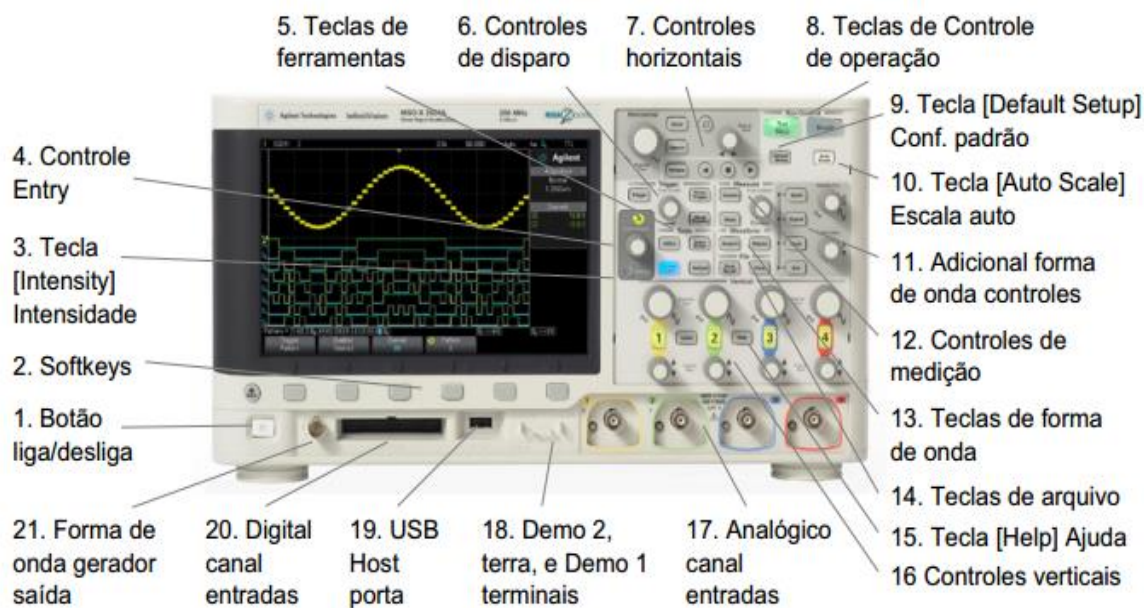


Figura 22 – Osciloscópio InfiniiVision MSO-X 2012^a

Fonte: manual InfiniiVision MSO-X

Os osciloscópios Agilent InfiniiVision 2000 série- X oferecem seguintes recursos:

- 70 MHz, 100 MHz e 200 MHz de largura de banda (valores específicos para cada modelo).
- Modelos de osciloscópio de armazenamento digital (DSO) de 2 e 4 canais.
- Modelos de osciloscópio de sinal misto de 2+8 canais e 4+8 canais (MSO). Um MSO permite depurar seus projetos de sinal misto usando sinais analógicos e sinais digitais fortemente correlacionados simultaneamente. Os 8 canais digitais têm taxa de amostragem de 1 G amostras/s, com uma taxa de alternância de 50 MHz.
- Tela WVGA de 8,5 polegadas.
- Taxa de amostragem intercalada de 2 G amostras/s ou não intercalada de 1 G amostra/s .
- 100 Kpts por canal MegaZoom IV memória de aquisição para as mais rápidas taxas de atualização de forma de onda, sem concessões. Expansível para 1 Mpts por canal.
- Todos os controles são pressionáveis para a realização de seleções rápidas.
- Tipos de disparo: borda, largura de pulso, padrão e vídeo.

- Opções de decodificação serial/disparo para: CAN/LIN, I2C/SPI, e UART/RS232. Há uma Listagem para exibir pacotes de códigos de série. Os canais digitais e a decodificação serial não podem ser ativados ao mesmo tempo. A tecla [Serial] tem precedência sobre a tecla [Digital]. Os disparos seriais podem ser usados quando os canais digitais estiverem ativados.

- Formas de onda matemáticas: adicionar, subtrair, multiplicar e FFT.
- Formas de onda de referência (2) para comparar com outros canais ou formas de onda matemáticas.

- Muitas medições integradas.
- Gerador de forma de onda integrado habilitado para licença com: formas de onda senoidal, quadrada, rampa, pulso, CC e ruído.

- Portas USB que facilitam a impressão, a gravação e o compartilhamento de dados.

- Módulo LAN/VGA opcional para conexão à rede e exibição da tela em um monitor diferente.

- Módulo GPIB opcional.

4.9. Analisadores de Emissões

4.9.1. Analisador de gases PC-MULTIGÁS

O PC-MULTIGÁS é um Analisador infravermelho de alta tecnologia para CO, CO₂, HC, O₂, NO_x, Lambda e AFR. Baseado no método de medição de infravermelho não dispersivo, que atende as normas vigente “NBRs, OIML R99 CLASS 1, ISO 3930 e ASM/BAR 97, onde a transferência de dados para o computador se dá através da interface USB.



Figura 23 – Analisador de Gases PC-MULTIGÁS.

Fonte: Autor

Dados técnicos:

Alimentação: 12VDC ou 110/220VAC - 60Hz- Escalas:

CO : 0 - 15%

CO₂: 0 - 20%

HC : 0 - 20000ppm Hexano

O₂ : 0 - 25%

NO_x Opcional: 0 - 5000 ppm

Lambda: 0 - 9.99

AFR : 0 - 99.99

Interface Serial: RS 232C

Eliminador de água Condensada (NAPRO, 2014).

4.9.2. Analisador de Opacidade NA9000

O sistema NA-9000 é um analisador de opacidade de fluxo parcial, ver Figura 24, provido de um módulo controlado por microprocessador. O conjunto ótico de

medição atende ou excede os seguintes requerimentos e normas: ISO(Worldwide), PTB – AVII(Germany) MOT(United Kingdom), 1996 French Regulations, NBR 12897 / 13037, onde o monitoramento das emissões é realizado através do software que fornece o detalhamento das medições.



Figura 24 – Analisador de Opacidade NA9000

Fonte: Autor

CARACTERÍSTICAS:

Opacidade	0 ... 99,9%
Coef. de Absorção de luz K	0 ... 9,99 m ⁻¹
Precisão	+/-2 relativo
Resolução	0,1
Fluxo	Parcial
Temperatura da câmara	75 °C nominal
Comprimento do feixe	430 mm (equivalente)
Tempo de resposta	0,9 ... 1,1s
Tensão de alimentação	220 VAC (12 VDC/110 VAC opcional)
Temperatura ambiente de funcionamento	5 ... 40 °C
Umidade ambiente de funcionamento	0 ... 95%

Frequência

50 / 60 Hz

Potência

400W (NAPRO, 2014)

CAPÍTULO V

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

5. Introdução

Neste capítulo serão abordados todos os aspectos relacionados à metodologia experimental adotada para o presente trabalho. Uma vez descritos e discutidos os aspectos construtivos e funcionais do aparato experimental, informando em detalhes quanto aos meios de obtenção dos valores e aos parâmetros de interesse. Resta neste momento do presente trabalho, abordar a metodologia empregada específica de cada dispositivo.

5.1. Poder Calorífico das Misturas de Biodiesel Ensaçadas

O biodiesel, B100, utilizado no experimento foi doação ao Laboratório de Estudos Motores e Emissões – UFPB (LEME). Devido a origem do biodiesel B100 ser desconhecida, não foi possível calcular de maneira empírica o poder calorífico do mesmo, como também não foi possível obter de forma experimental, já que era necessário uma bomba calorimétrica para obter o PCS de cada composição de combustível utilizado nos testes experimentalmente.

No entanto, o poder calorífico das misturas de combustíveis utilizadas na experimentação do presente trabalho foi estipulado através de médias de valores encontrados na literatura, ver Tabela 13. Visto que a média dos valores do PCI encontrados na literatura foi próxima ao valor do PCI do biodiesel de origem da gordura do frango encontrado no artigo publicado por Marcelo José da Silva na Rev. bras. eng. agríc. ambient. vol.16 no.3 Campina Grande 2012, foi utilizado os valores da publicação como referência para o presente estudo.

Tabela 13 - Poder calorífico do biodiesel de diferentes origens

Origem Biodiesel	Poder Calorífico (Kcal/Kg)	Referência
Farelo de arroz	9560,23	Lin et al. 2009

Algodão	9520	Ramos, 2004
Pequi	9590	Ramos, 2004
Babaçu	9440	Ramos, 2004
Mamona	9046	Ramos, 2004
Dendê	9530	Ramos, 2004
Milho	10746,4 – 10779,9	Patil e Deng. 2009
Canola	10681,8 – 10748,8	Patil e Deng. 2009
Pinhão Manso	9485,6 – 9959,3	Patil e Deng. 2009
Karanja	9043,06 – 9495,2	Patil e Deng. 2009
Soja	7987,01	Pimentel e Patzek, 2005
Gordura de Frango	9181,24	Marcelo José da Silva, 2012
Média:	9484,10 (39,71 MJ/kg)	Autor

Fonte: Autor

Onde a Tabela 14 indica os valores do poder calorífico superior do biodiesel de origem da gordura de frango em diversas proporções obtidos experimental de acordo com publicação na Rev. bras. eng. agríc. ambient. vol.16 no.3 Campina Grande 2012.

Tabela 14 – Poder calorífico superior de amostras de biodiesel usado como referência

Diesel / Biodiesel	Amostra 1 (MJ/Kg)	Amostra 1 (MJ/Kg)	Amostra 1 (MJ/Kg)	Média (MJ/Kg)
B0	43,834	43,496	45,273	44,351
B20	44,166	43,637	43,195	43,666
B40	42,704	41,975	42,363	42,347
B60	40,188	41,759	41,414	41,120
B100	38,134	39,718	37,468	38,440

Fonte: Autor

Segundo demonstrado na publicação, o poder calorífico superior reduz-se linearmente com o aumento na porcentagem de biodiesel na mistura. O coeficiente de regressão linear (R²) obtido na equação é 0,98, sinal de que o modelo da equação está

adequado para estimar valores intermediários aos testes realizados com o biodiesel da gordura de frango e óleo diesel.

A equação obtida com a regressão linear foi:

$$PCS = 44,61 - (5,781 * Bx)/100 \quad (8)$$

Onde:

PCS - poder calorífico superior, MJ kg⁻¹

Bx - proporção de biodiesel da gordura de frango, %

Aplicando a equação foi possível obter os valores de PCS para o B10 e B50, e complementar a tabela de PCS conforme demonstrado na Tabela 15.

Tabela 15 - Poder calorífico superior utilizado como referência

Origem Biodiesel	Poder Calorífico Superior (MJ/Kg)	Descrição
B0	44,351	Diesel com 7% de biodiesel
B10*	44,032	Diesel com 10% de biodiesel Gordura de Frango
B20	43,666	Diesel com 20% de biodiesel Gordura de Frango
B40	42,347	Diesel com 40% de biodiesel Gordura de Frango
B50*	41,719	Diesel com 50% de biodiesel Gordura de Frango
B60	41,12	Diesel com 60% de biodiesel Gordura de Frango
B100	38,44	100% de biodiesel Gordura de Frango

Fonte: Autor

Após correção dos valores do poder calorífico superior (PCS) para poder calorífico inferior (PCI) dos combustíveis B0, B10, B20, B40, B50, B60 e B100 , foi possível obter a Tabela 16.

Tabela 16 - Poder calorífico inferior calculado

Origem Biodiesel	Poder Calorífico Inferior (MJ/Kg)	Descrição
B0	41,3	Diesel com 7% de biodiesel
B10*	40,98	Diesel com 10% de biodiesel Gordura de Frango
B20	40,61	Diesel com 20% de biodiesel Gordura de Frango
B40	39,3	Diesel com 40% de biodiesel Gordura de Frango
B50*	38,67	Diesel com 50% de biodiesel Gordura de Frango
B60	38,07	Diesel com 60% de biodiesel Gordura de Frango
B100	35,39	100% de biodiesel Gordura de Frango

Fonte: Autor

5.2. Cálculo Para Formulação das Misturas de Biodiesel

As misturas de biodiesel foram realizadas utilizando de óleo diesel S500 (B7 – possui em sua composição 7% de biodiesel) encontrado comumente nos postos de abastecimento e o biodiesel B100.

Como o óleo diesel comercializado atualmente possui 7% de biodiesel em sua formulação, para realizar tal procedimento foi formulado por dedução matemática das proporções necessárias o equacionamento a seguir:

$$Q_{bd} = \frac{Q_L}{0,93} * (\%bd - 0,07) \quad (9)$$

$$Q_d = Q_L - Q_{bd} \quad (10)$$

Onde:

Q_{bd} : Quantidade de B100 que deve ser acrescentada

QL : Quantidade em litros da mistura desejada de biodiesel

%bd: Porcentagem que deseja obter de biodiesel

Qd : Quantidade de óleo Diesel (B7) utilizada na mistura

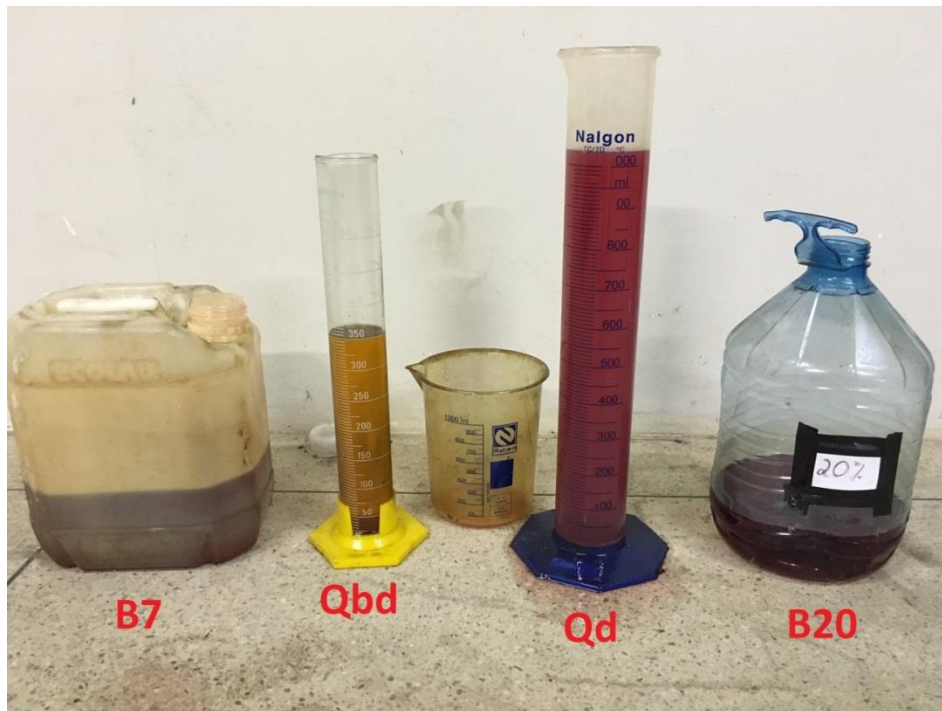


Figura 25 - Preparação de amostra de combustível B20

Fonte: autor

Por exemplo, para se obter a quantidade de 1,5l de biodiesel B20, temos:

$$QL = 1,5 \text{ L} ; \%bd = 0,20$$

Aplicando os valores desejados, obtem-se:

$$Q_{bd} = 0,209 \text{ L} = 209\text{ml}$$

Então,

$$Q_d = QL - Q_{bd}$$

$$Q_d = 1500\text{ml} - 209\text{ml} = 1291 \text{ ml}$$

Sendo assim necessários em 1291 ml de óleo diesel (B7) acrescentar-se 209ml de biodiesel B100 para se ter 1,5 L de biodiesel B20.

Partindo dessa metodologia foram formuladas as misturas de biodiesel B10, B20 e B50 conforme Figura 27.



Figura 26 – Combustíveis biodiesel B10, B20 e B50

Fonte: autor

5.3. Medição do Tempo de Injeção por Rotação

Para medição do tempo injeção do motor MWM 4.07 TCE que utiliza bico injetor de combustível Bosch 0445110231, ver Figura 28, foi feito um “jump” na alimentação deste, localizado no primeiro cilindro do motor e serve como ponto de medição do sinal, sendo ligado a um dos canais do Osciloscópio InfiniiVision MSO-X 2012A, o qual fornece a frequência e tensão do sinal.

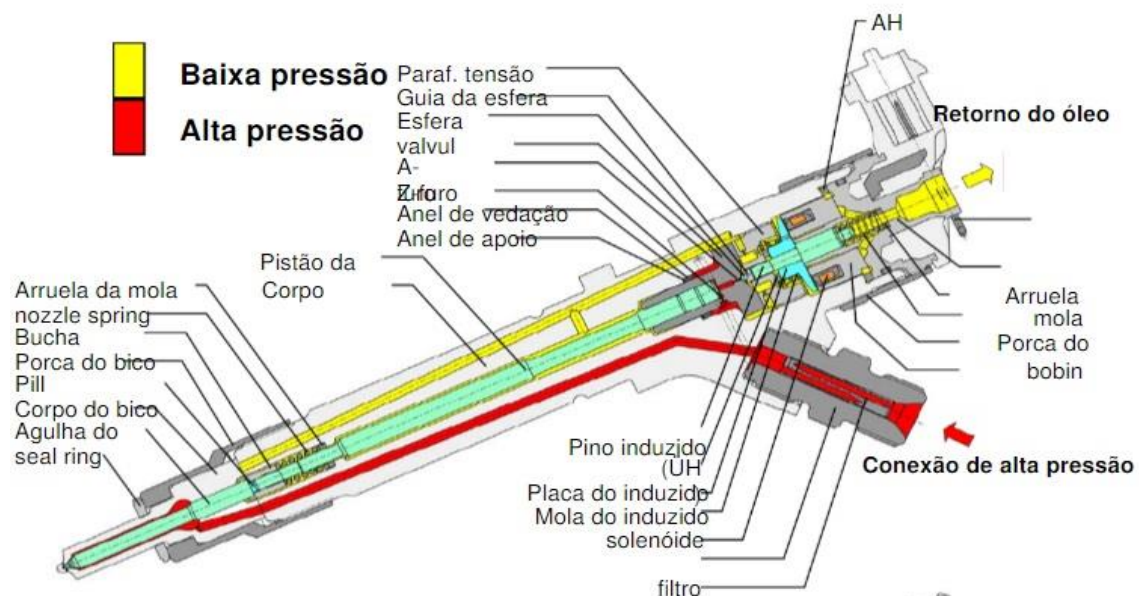


Figura 27- Bico injetor Bosch, aplicação motor MWM 4.07 TCE

Fonte: <http://dicasengenharia.blogspot.com.br/2008/12/viso-geral-do-sistema-de-injeo-diesel.html>

Com auxílio do scanner PC TRUCK 5000 comunicando com a unidade central eletrônica (UCE) Bosch EDC 16/17 do motor, via OBD, foi possível verificar com a função modo contínuo (leitura dinâmica de parâmetros do veículo todos ao mesmo tempo na tela do computador) a rotação atual que o motor estava operando, ver Figura 29, bem como outros parâmetros de fundamental importância como temperatura da água do motor, pressão do rail, torque do motor, dentre outros.

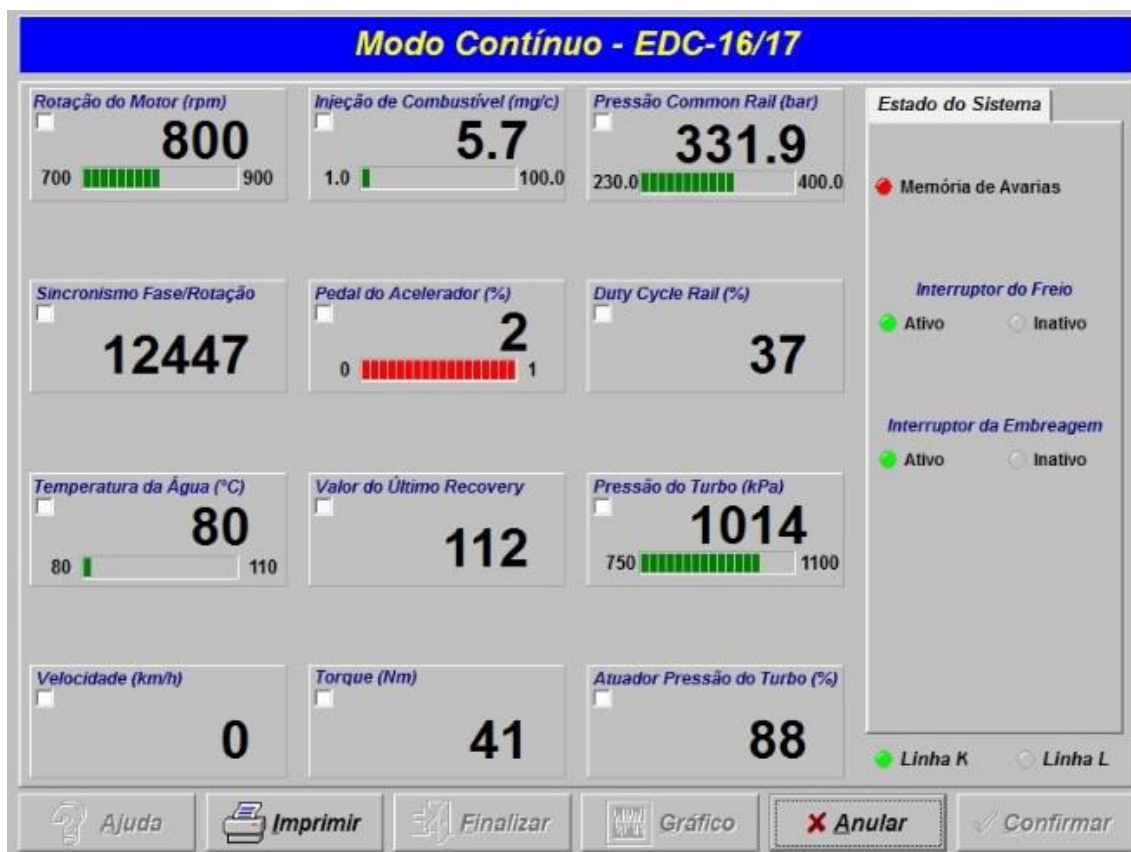


Figura 28 – Modo contínuo do Scanner Napro Pc Truck 5000

Fonte: Autor

Utilizando de ajustes dos controles horizontais do osciloscópio, responsáveis pela ampliação da escala do sinal do tempo de injeção, e auxílio dos ajustes de controles verticais, responsáveis pela ampliação do sinal da tensão, foi possível ajustar a escala para medição do sinal em Microsegundos.

Para dar início a medição o motor é acionado e permanece em funcionamento na marcha lenta até atingir temperatura de operação. Após atingir temperatura ideal é aumentada a rotação do motor para o primeiro ponto de medição de 800 RPM. Para tal procedimento é utilizado um acelerador fabricado no próprio Laboratório de Estudos Motores e Emissões (LEME) - UFPB, o qual é constituído de um potenciômetro multivolta de resistência de 10 Kohms que permite pequenas variações na aceleração, aumentando ou diminuindo gradualmente a rotação para as faixas de rotações determinadas para o ensaio.

Após estabilizada a rotação do motor no ponto em que se deseja medir, é utilizado o controle horizontal para colocar a escala do tempo em Milisegundos afim de tornar mais fácil a captura do tempo do sinal, logo em seguida usando a tecla do

controle de operação do osciloscópio com função de pause/play, para pausar a imagem transcorrida na tela, é possível com os controles da escala horizontal e vertical ajustar a imagem do sinal na tela e utilizar a tecla de print para salvar a imagem. Tal procedimento é realizado na faixa de rotação do motor de 800 a 2600 RPM a cada 100 RPM, levantando os dados de tempo da pré injeção e injeção principal para as misturas de combustíveis B7, B10, B20 E B50 utilizadas no experimento.

As imagens coletadas do osciloscópio foram analisadas, sendo medido no eixo horizontal o tempo da pré injeção e injeção principal através da própria escala fornecida de 500 Microsegundos cada casa, a qual é fracionada em 4 partes com 125 Microsegundos cada, ver Figura 30.

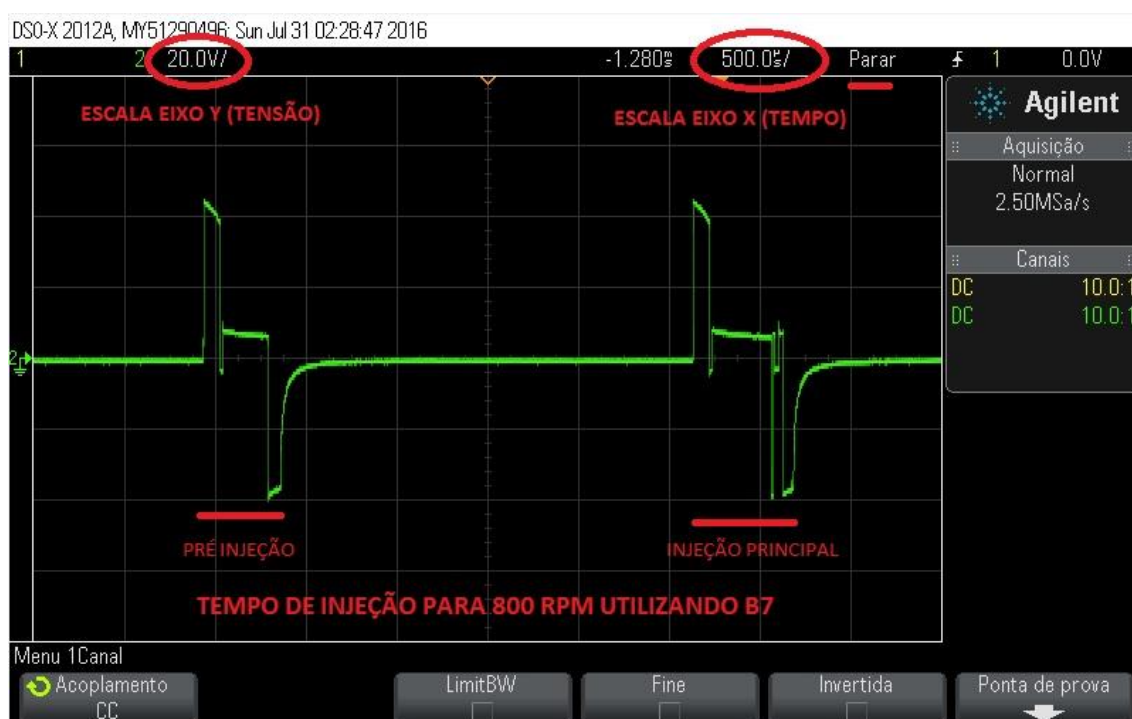


Figura 29 – Medição de tempo de injeção

Fonte: Autor

Através desses dados foi gerada a tabela e o gráfico com os valores do tempo de injeção total para cada mistura ensaiada.

5.4. Medição dos Gases de Exaustão e Opacidade

Concomitante a medição do tempo de injeção foi feita a medição dos gases de exaustão do motor MWM 4.07 TCE utilizando as diferentes misturas de biodiesel.

Para efetuar a medição dos gases o motor foi estabilizado nas rotações dentro da faixa de 800 a 2600 rpm a cada 100 rpm e utilizando o equipamento PC-MULTIGÁS para analisar os gases através do método infravermelho de alta tecnologia para CO, CO₂, HC, O₂, NO_x, Lambda e AFR.



Figura 30 – Acessório do PC-Multigás para ler a rotação do motor

Fonte: Autor

A sonda de amostragem do equipamento é colocada ao ar livre e através do software do equipamento é inicializado o processo de medição e feito o procedimento de zeragem, o qual consiste em ter o ar ambiente como referência para as medições. Em seguida a sonda de amostragem é inserida no escapamento da exaustão do motor após está em regime de operação e iniciada a medição. Ao término de cada determinação, realizou-se a drenagem completa do sistema de alimentação, evitando, com isso, a contaminação do ensaio seguinte. Além disso, depois de trocado o combustível, o motor ficou em funcionamento em torno de 10 minutos antes do início de cada teste.

Devido a medição do equipamento ser feita instantaneamente, ver Figura 32, foram feitas 5 medições dos gases a cada 10 segundos, e depois feita as médias dos valores para CO, CO₂, O₂, HC E NO_x obtidos na queima das misturas de B7, B10, B20 E B50. Posteriormente no capítulo VI, que trata dos resultados e análises experimentais, será mostrado os gráficos indicativos das emissões analisadas.

		UFPA - UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ RECOGAS-REDE C. P. N. N. DO GÁS NATURAL Telefone : 0 XX 83 3216-7872 JOÃO PESSOA - PARAIBA - BRASIL	
Número de Série	Versão Software	Versão do Hardware	Valor P.E.F.
84429	5.129	5.4	0,490
RPM (Rotação do Motor)		: 800 rpm	
Temperatura do Óleo		:	°C
CO (Monóxido de Carbono)		: 0,17	% vol
CO2 (Dióxido de Carbono)		: 1,7	% vol
O2 (Oxigênio)		: 18,9	% vol
HC (Hidrocarbonetos)		: 17	ppm vol
NOx (Óxido de Nitrogênio)		: 99	ppm vol
COc (Monóxido de Carbono Corrigido)		: 1,36	% vol
HCc (Hidrocarbonetos Corrigido)		: 140	ppm vol
Fator de Diluição		: 8,02	
Diluição		: 1,87	% vol
λ Lambda		: 2,000	
Relação Ar Combustível A.F.R.		: 27,56	
Data : 31/07/16		Napro Eletrônica Industrial Ltda 11.54/11C	

Figura 31 – Relatório das emissões de poluentes instantânea para B20 a 800rpm

Fonte: Autor

Com analisador de opacidade NA-9000T, opacímetro de fluxo parcial, instrumento utilizado para determinar a opacidade da fumaça gerada por um motor de ignição por compressão, captando parte da fumaça expelida através do cano de descarga, ver Figura 33, foi possível determinar os valores da opacidade do motor MWM 4.07 TCE em estudo.

Sendo a opacidade medida igual a fração da luz emitida pela fonte de luz do opacímetro que não atinge o receptor, e o coeficiente de absorção de luz (k) definido pela lei de Beer-Lambert com base na opacidade.

Seguiu-se a metodologia aplicada para medição dos gases poluentes, aguardava-se o motor entrar em regime de operação em seguida estabilizar na rotação para início da medição, concomitante ao aquecimento do motor foi esperado o tempo de aquecimento do equipamento, tempo decorrido entre o momento em que o opacímetro é ligado e o momento em que ele fica apto a satisfazer as exigências metrológicas, e então inserida a sonda de amostragem no cano de exaustão do motor. Assim foram feitas 5 medições em intervalos de 10 segundos do nível de opacidade nos gases de exaustão do motor.



Figura 32 – analisador de opacidade NA-9000T da Napro Eletrônica

Fonte: Autor

Após a realização da medição de opacidade para a faixa de rotação escolhida e com diferentes porcentagens de biodiesel, um laudo de emissões é emitido pelo referido equipamento. A amostra das medições e os valores medidos são mostrados a seguir:



UFPA - UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
RECOPAS-REDE C. P. N. N. DO GÁS NATURAL
Telefone : 0 XX 83 3216-7872
JOÃO PESSOA - PARAIBA - BRASIL

Medição Instantânea
Impressão de Valores :

Valores Instantâneos :

RPM (Rotação do Motor) : 780 rpm
Temperatura do Tubo : 75 °C
Temperatura do Gás : 38 °C
% Opacidade : 4,0 %
K (Coeficiente de Absorção da Luz): 0,09 m⁻¹

Valores Confirmados:

Medição 1:	Rotação: 810 rpm	K (Coeficiente de Absorção da Luz)	0,10 m ⁻¹
Medição 2:	Rotação: 820 rpm	K (Coeficiente de Absorção da Luz)	0,10 m ⁻¹
Medição 3:	Rotação: 810 rpm	K (Coeficiente de Absorção da Luz)	0,09 m ⁻¹
Medição 4:	Rotação: 810 rpm	K (Coeficiente de Absorção da Luz)	0,09 m ⁻¹
Medição 5:	Rotação: 820 rpm	K (Coeficiente de Absorção da Luz)	0,07 m ⁻¹
Medição 6:	Rotação: 810 rpm	K (Coeficiente de Absorção da Luz)	0,08 m ⁻¹
Medição 7:	Rotação: 810 rpm	K (Coeficiente de Absorção da Luz)	0,09 m ⁻¹
Medição 8:	Rotação: 810 rpm	K (Coeficiente de Absorção da Luz)	0,09 m ⁻¹
Medição 9:	Rotação: 810 rpm	K (Coeficiente de Absorção da Luz)	0,10 m ⁻¹
Medição 10:	Rotação: 800 rpm	K (Coeficiente de Absorção da Luz)	0,09 m ⁻¹

Média Calculada: 0,08 m⁻¹

Data 31/07/16

Versão : 1.59/12J
Napro Eletrônica Industrial Ltda

Figura 33 – Relatório da opacidade dos gases e coeficiente de absorção da luz para B20 a 800rpm

Fonte: Autor

5.5. Medição do Consumo das Misturas de Combustíveis Ensaaiadas

A medição do consumo de combustível foi realizada utilizando um recipiente com capacidade de 2 litros de óleo e uma balança da marca Balmak ELC-25 com capacidade de 25 kilogramas e precisão de 2 gramas, ver Figura 35.



Figura 34 - Recipiente e balança para medição de consumo

Fonte: Autor

Utilizando um suporte para o reservatório de vidro transparente e com graduação, foi possível verificar o consumo de óleo em volume.

O consumo de combustível em massa, que é o mais interessante para fins de quantificar a energia consumida, foi medido através da balança interligada por um cabo serial a um notebook com software criado no próprio LEME – UFPB para aquisição dos valores lidos na balança de acordo com a configuração desejada.

A medição foi realizada de 800 a 2600 rpm, a cada 100 rpm, onde foi estabilizado o motor em cada rotação desejada para ensaio com auxílio do Scanner NAPRO PC5000 era possível verificar a rotação. Ao estabilizar o motor na rotação requerida é configurado no software da balança os dados de entrada, sendo o tempo de medição que se deseja e o intervalo entre amostras coletadas.

Foi utilizado o tempo de medição total do consumo de 180 segundos com intervalo de aquisição do consumo do biodiesel de 20 segundos, totalizando 9 amostras de medição. É feita a média das amostras de consumo e tem-se o valor do consumo a cada 20s de operação do motor estabilizado a dada rotação conforme Tabela 17.

Tabela 17 - Média de consumo da massa de combustível

RPM	B7 (20s)	B10 (20s)	B20 (20s)	B50 (20s)
	g	g	g	g
800	3,5	4,4	4,2	4,8
900	4,4	5,7	4	4,2
1000	5,5	3,5	3,5	4,2
1100	5,7	4,2	4,2	5,1
1200	6	4,8	4,8	5,1
1300	7,5	5,3	5,3	5,1
1400	7,3	6	6,2	6
1500	7,7	6,4	6,8	6,6
1600	9,1	7,3	7,3	8
1700	9,3	8	8,8	8,8
1800	9,3	9,3	9,1	9,5
1900	10,4	10,4	10,6	10,4
2000	12	11,1	11,1	11,1
2100	12,6	9,7	12	12
2200	15,1	16,6	17,1	13,3
2300	15,7	14,4	14,6	16,6
2400	17,5	14,6	14,6	16,4
2500	18,6	16,8	19,7	16,2
2600	19,5	15,3	17,3	20,4

Fonte: Autor

5.6. Cálculo do Consumo Específico de Combustível

O consumo específico de combustível (CEC) é a razão do fluxo mássico de combustível por unidade de potência fornecida pelo motor, sendo um parâmetro de comparação muito usado para mostrar quão eficientemente um motor está transformando combustível em trabalho.

Com o motor estabilizado nas rotações pré definidas, durante 180 segundos para cada rotação, através do scanner Napro PC5000 foi monitorada a potência gerada e o

consumo de combustível foi medido com auxílio de uma balança e o software para aquisição dos valores da balança.

Aplicando a equação do CEC, tem-se:

$$CEC = \frac{\dot{m}}{w} \quad (11)$$

$$CEC = \frac{\left(\frac{m}{180}\right) * 3600}{w}$$

Onde:

\dot{m} = vazão mássica de combustível [g/h]

W = potência do motor a dada rotação [kw]

CEC = consumo específico de combustível [g/kw*h]

Então, utilizando a equação do consumo específico descrita foi possível ter os dados da Tabela 16.

Tabela 18 – Consumo específico de combustível

RPM	CEC B7 (g/Kw*h)	CEC B10 (g/Kw*h)	CEC B20 (g/Kw*h)	CEC B50 (g/Kw*h)
800	186,33	265,26	181,44	276,43
900	166,44	234,78	152,79	161,28
1000	170,52	115,31	111,12	131,95
1100	158,39	119,96	117,82	142,62
1200	150,78	127,32	127,32	130,73
1300	169,32	123,72	121,58	116,52
1400	145,22	122,78	134,03	122,78
1500	143,75	123,08	136,10	123,22
1600	152,94	127,07	131,30	140,89
1700	142,98	126,39	144,96	140,43
1800	129,17	137,12	135,94	140,38
1900	123,49	138,95	146,21	141,03

2000	145,26	130,81	142,53	136,42
2100	148,11	114,33	140,32	142,35
2200	166,29	188,72	193,75	153,20
2300	161,59	152,04	156,58	185,90
2400	169,91	145,89	143,89	168,25
2500	171,12	156,92	181,31	148,71
2600	172,38	135,16	152,79	180,21

Fonte: Autor

5.7. Cálculo do Energético de Biodiesel Injetado por Ciclo Motor para Dada Rotação

De posse dos dados do consumo de massa combustível para cada mistura de biodiesel a dada rotação, tem-se os dados de entrada necessários para cálculo da quantidade de energético de biodiesel.

Conforme a seguinte metodologia aplicada abaixo, tomando de exemplo a rotação de 1000 RPM utilizando B7, tem-se:

Convertendo 1000 rotações por minuto para rotações por segundo tem-se: 16,666 rotações por segundo, e sabendo que um ciclo motor para ser completo necessita de duas voltas do virabrequim do motor, então divide-se o valor de rotações por segundo por 2 e tem-se o valor de 8,333 ciclo motor por segundo.

Utilizando a média do valor do consumo de massa do B7 em 180s a 1000 rpm para converter em consumo por segundo tem-se: 50g dividido por 180 segundos igual a 0,277g por segundo a qual sendo transformado em miligramas é igual a 277,777 mg/s.

Então com os valores de consumo dado em mg/s e o número de ciclos motor realizados em um segundos, é possível determinar quanto de combustível está sendo consumido em um ciclo motor, já que em 1 segundo o motor realiza 8,333 ciclos e consome 277,777 mg. Divide-se o valor de gramas consumidas em um segundo por número de ciclos em um segundo e tem-se o valor de consumo em mg por ciclo sendo: 33,334 mg/c e para determinar o valor consumido por injetor em cada ciclo motor, sabe-se que ocorrem 4 injeções de combustível por ciclo, então divide-se o valor de consumo de massa por ciclo por 4 e tem-se: 8,333 mg/c injetadas por cada injetor.

Para realizar a substituição de 50% da massa injetada de biodiesel é dividido por 2 o valor da 8,333 que corresponde a quantidade de massa injetada por ciclo motor em cada injetor, então tem-se: 4,166 mg/c por injetor correspondentes a 50% de biodiesel.

Com os valores do poder calorífico inferior de cada mistura dados em megajoules por kilograma e convertendo o valor de 4,166 mg/c por injetor em kg/c por injetor é possível ter o valor energético correspondente a quantidade de massa que está sendo injetada da seguinte maneira:

$$4,166 \text{ mg/c} = 0,00000416 \text{ kg/c}$$

Onde o PCI do B7 utilizado nesse estudo é dado por 41,30 MJ/Kg, aplicando regra de três simples tem-se:

$$\text{Em 1kg de B7} \quad - \quad 41,30 \text{ MJ}$$

$$4,166 \times 10^{-6} \text{ kg de B7} \quad - \quad x \text{ MJ}$$

Então:

$$x = \frac{41,30 \text{ MJ} * 4,166 \times 10^{-6} \text{ kg}}{\text{kg}}$$

$$x = 0,000172 \text{ MJ}$$

Tendo assim o valor energético do B7 correspondente ao consumo em massa por ciclo por injetor a rotação de 1000 rpm, onde tal metodologia foi aplicada para faixa de rotação ensaiada de 800 a 2600 rpm.

Tabela 19 - Valores energético de biodiesel

RPM	B7 Energético 50%	B10 Energético 50%	B20 Energético 50%	B50 Energético 50%
	MJ	MJ	MJ	MJ
800	0,000137667	0,000170750	0,000160748	0,000177238
900	0,000152963	0,000197311	0,000135367	0,000136061
1000	0,000172083	0,000109280	0,000108293	0,000122455
1100	0,000162697	0,000117973	0,000116908	0,000134759
1200	0,000154875	0,000125217	0,000124086	0,000123529
1300	0,000180026	0,000126092	0,000124954	0,000114027
1400	0,000162250	0,000131721	0,000135367	0,000124296

1500	0,000160611	0,000132047	0,000139879	0,000128900
1600	0,000176385	0,000140869	0,000139597	0,000145013
1700	0,000170059	0,000144635	0,000159255	0,000151647
1800	0,000160611	0,000159367	0,000154168	0,000153964
1900	0,000155781	0,000168953	0,000170989	0,000159429
2000	0,000185850	0,000170750	0,000169208	0,000161125
2100	0,000186833	0,000143105	0,000174043	0,000165729
2200	0,000212758	0,000232841	0,000236892	0,000175773
2300	0,000215478	0,000193022	0,000194222	0,000210163
2400	0,000226576	0,000187825	0,000186129	0,000198721
2500	0,000231280	0,000207632	0,000240953	0,000188194
2600	0,000232974	0,000181258	0,000203050	0,000228054

Fonte: Autor

5.8. Cálculo da Quantidade de GNV Injetado para Substituição de 50% do Biodiesel

Para o cálculo da quantidade de gás natural veicular (GNV) a ser injetado na câmara de combustão objetivando ter uma injeção com proporção de 50% de GNV e 50% de Biodiesel é necessário ter como referência o valor energético que está sendo inserido na câmara de combustão apenas com a injeção de cada mistura do Biodiesel.

O GNV usado nos testes é oriundo dos campos de produção de Gás/óleo do Rio Grande do Norte, Bahia, Sergipe, Alagoas, e agora também da região sudeste, com a interligação do Gasoduto Sudeste-Nordeste (Gasene) distribuído pela Companhia Paraibana de Gás PBGÁS. As tabelas abaixo apresentam a composição e as propriedades do gás natural utilizado no Estado da Paraíba.

Tabela 20 - Composição do gás natural no Estado da Paraíba – PBGÁS

Composição média do gás natural no estado da Paraíba – PB GÁS	%volume
Metano	90,09
Etano	6,84
Dióxido de Carbono	1,56
Nitrogênio	1,35

Proprano	0,16
-----------------	------

Fonte: PBGÁS (2016)

Tabela 21 - Propriedade do gás natural no Estado da Paraíba – PBGÁS

Poder Calorífico Superior (kcal/m³)	9100
Densidade Relativa ao Ar (kg/m³)	0,614
Massa Específica (kg/m³)	3,77

Fonte: PBGÁS (2016)

Devido a unidade do PCI para o biodiesel está em MJ/kg, é necessário a conversão da unidade do PCI do gás natural fornecido pela PBGÁS de Kcal/m³ para MJ/m³, e como os valores mensurados são referidos a massa é feita a conversão do volume (m³) para massa (kg) para se ter os valores do PCI do gás natural em MJ/kg.

Utilizando do valor fornecido pela Tabela 21, que informa a densidade do GNV relativa ao ar e sabendo que nas condições de 20 °C e 101,325 kPa, o ar seco tem uma densidade de 1,2041 kg/m³, obtem-se a densidade do GNV.

$$\text{Densidade do GNV relativa ao AR} = \text{Densidade GNV} / \text{Densidade do AR}$$

Então,

$$\text{Densidade GNV} = \text{Densidade GNV relativa ao AR} * \text{Densidade do AR}$$

$$\text{Densidade GNV} = 0,614 * 1,2041$$

$$\text{Densidade GNV} = 0,7393 \text{ kg/m}^3$$

Calculado os valores de massa de combustível injetado por ciclo, convertendo em termos de energético, para cada mistura e tendo de posse o valor do poder calorífico inferior (PCI) do GNV, ver Tabela 19, é possível aplicando em regra de três simples se obter o valor da quantidade de massa de GNV necessária para repor a energia retirada da injeção do biodiesel, da seguinte maneira:

Aplicando, por exemplo, na rotação do motor de 1000 RPM utilizando o combustível B7, temos o valor de 50% da energia injetada por cada bico injetor por

ciclo motor correspondente a $172,083 \times 10^{-6}$ Megajoules, como o PCI do GNV PB é de 9100 kcal/m^3 , equivalente a $38,01 \text{ MJ/m}^3$, convertendo para energia por massa tem-se $51,41 \text{ MJ/kg}$, onde 1 kg de GNV possui $51,41$ Megajoules de energia, então com a necessidade de repor 50% da energia retirada da injeção de combustível B7, aplica-se a regra de três e obtem-se o valor em kilograma correspondente a massa de GNV que irá repor tal energia.

Sendo:

Em 1 kg de GNV – $51,41 \text{ MJ}$

$x \text{ kg}$ – $172,083 \times 10^{-6} \text{ MJ}$

Então:

$$x = \frac{172,083 \times 10^{-6} \text{ MJ} * 1 \text{ kg}}{51,41 \text{ MJ}}$$

$$x = 3,3472 \times 10^{-6} \text{ kg de GNV}$$

De modo sistemático a metodologia foi aplicada para toda faixa de rotação experimentada. Com auxílio do software excel foi gerada a tabela de massa de GNV necessária para repor 50% da injeção de cada biodiesel.

Tabela 22 - Quantidade de massa de GNV para reposição da injeção de biodiesel

RPM	GNV para B7	GNV para B10	GNV para B20	GNV para B50
	50%	50%	50%	50%
	kg	kg	kg	kg
800	2,67782E-06	3,32134E-06	3,12678E-06	3,44753E-06
900	2,97535E-06	3,83799E-06	2,63308E-06	2,64659E-06
1000	3,34727E-06	2,12566E-06	2,10646E-06	2,38193E-06
1100	3,16469E-06	2,29474E-06	2,27402E-06	2,62126E-06
1200	3,01255E-06	2,43565E-06	2,41366E-06	2,40282E-06
1300	3,50176E-06	2,45268E-06	2,43054E-06	2,21799E-06
1400	3,156E-06	2,56218E-06	2,63308E-06	2,41775E-06
1500	3,12412E-06	2,5685E-06	2,72085E-06	2,50729E-06

1600	3,43096E-06	2,7401E-06	2,71536E-06	2,82071E-06
1700	3,30789E-06	2,81337E-06	3,09774E-06	2,94976E-06
1800	3,12412E-06	3,09992E-06	2,99879E-06	2,99482E-06
1900	3,03016E-06	3,28638E-06	3,326E-06	3,10113E-06
2000	3,61506E-06	3,32134E-06	3,29135E-06	3,13412E-06
2100	3,63418E-06	2,7836E-06	3,38539E-06	3,22366E-06
2200	4,13845E-06	4,5291E-06	4,60789E-06	3,41904E-06
2300	4,19137E-06	3,75456E-06	3,7779E-06	4,08798E-06
2400	4,40724E-06	3,65347E-06	3,62049E-06	3,86541E-06
2500	4,49874E-06	4,03875E-06	4,68688E-06	3,66065E-06
2600	4,53169E-06	3,52573E-06	3,94962E-06	4,43598E-06

Fonte: Autor

CAPÍTULO VI

RESULTADOS E ANALISES

6. Introdução

Os resultados experimentais e suas análises relacionadas com o objetivo do estudo em questão são considerados no presente capítulo e apresentados divididos nos seguintes tópicos.

6.1. Curvas de Tempo de injeção Para Cada Mistura Combustível

Após análise e medição dos tempo da pré-injeção e injeção principal foram somado os tempos e obtido o valor de tempo de injeção para cada rotação ensaiada.

Analizando as curvas geradas do tempo de injeção para os combustíveis B7, B10, B20 e B50, ver Figura 36, é possível verificar que as curvas são muito próximas indicando assim que não há uma notável discrepância entre os tempos de injeção com a mudança do biodiesel ensaiado.

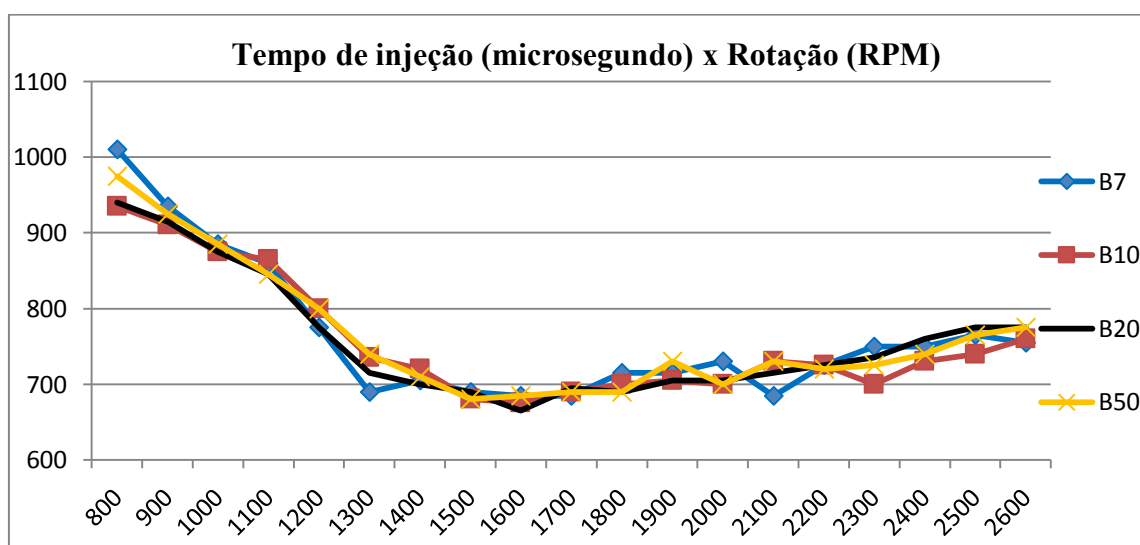


Figura 35 - Tempo de injeção x Rotação

Fonte: Autor

6.2. Curvas de Torque e Potência para Cada Mistura de Combustível

A Figura 37, mostra a curva de torque em newton metro para as faixas de rotação de cada combustível ensaiado. A curva de torque foi levantada referente aos torques de atrito com o motor operando sem carga através do valor demonstrado no modo contínuo dado pelo scanner para veículos pesados.

Nota-se que na maioria dos pontos da curva de torque utilizando o combustível B7 tem valores maior que nas curvas levantadas com os combustíveis B10, B20 e B50, devido ao PCI do B7 ser maior que os das outras misturas de combustíveis ensaiadas.

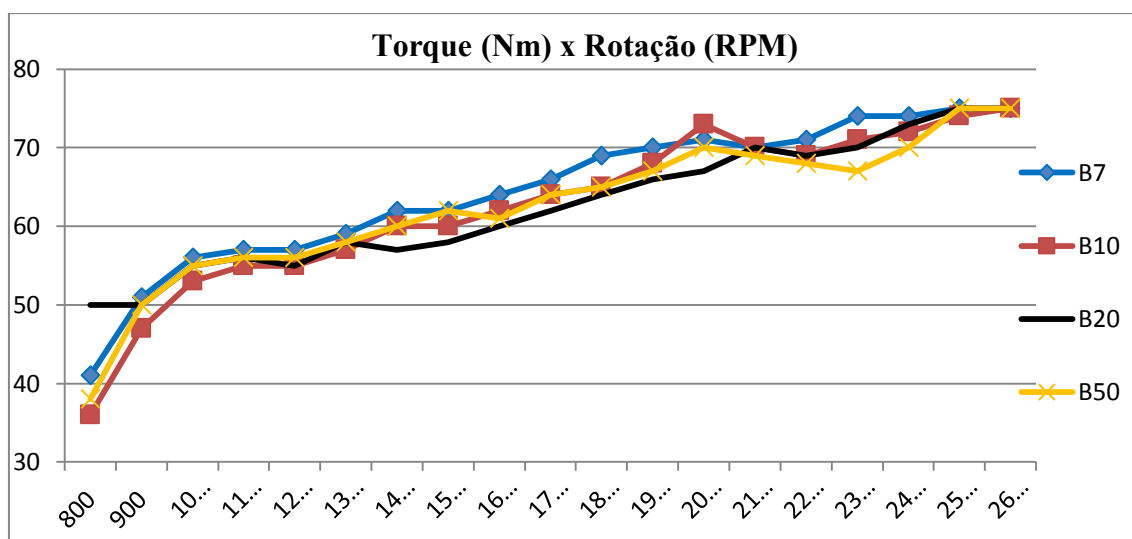


Figura 36 - Torque x Rotação

Fonte: Autor

Os pontos das curvas de potência da figura 38 foram calculadas a partir dos valores de torque e rotação para cada combustível. Verifica-se que com o motor trabalhando sem carga e utilizando diferentes proporções de biodiesel não houve grande influência nos resultados da potência, obtendo-se os valores de potência provenientes da queima de cada combustível a dada rotação com pouca divergência.

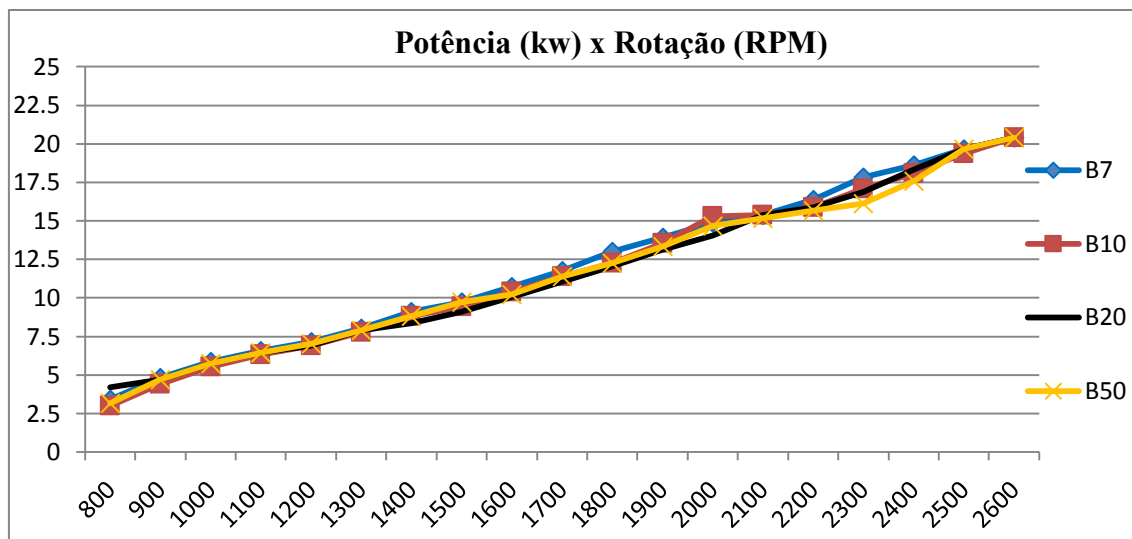


Figura 37 – Potência X Rotação

Fonte: Autor

O valor de potência máxima encontrado foi de 20,42 kw a 2600 rpm para todas as amostras de combustíveis ensaiadas. Devido ao torque máximo ter sido atingindo na rotação de 2600 rpm com todas as proporções de biodiesel tendo o mesmo valor de 75 Nm.

6.3. Consumo no Tempo e Consumo Específico de Combustível

De acordo com a Figura 39 a curva que apresentou o maior consumo de combustível em 180 segundos de medição foi a do combustível B7. Já o menor consumo ficou demonstrado pela curva do B10, porém com leve vantagem em relação aos valores das curvas de B20 e B50.

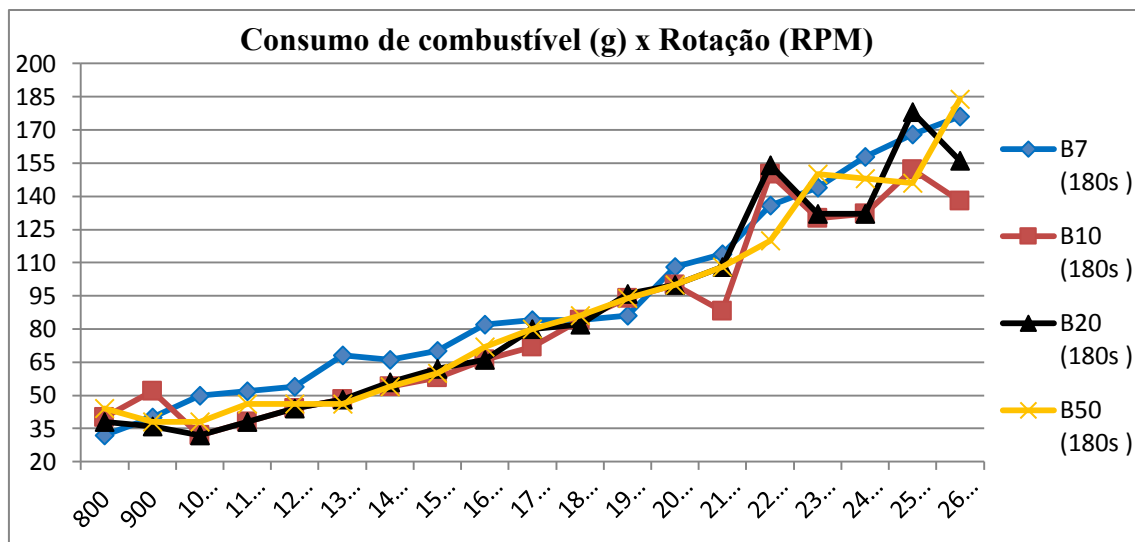


Figura 38 – Consumo de combustível x Rotação

Fonte: Autor

Um parâmetro importante para avaliar o desempenho de um motor é o consumo específico de combustível. Da Figura 40, verifica-se um menor CEC para a curva de combustível B10, exceto nos pontos de marcha lenta (800rpm), 900 e 2200 rpm. O maior consumo específico pode ser visto na curva para combustível B7.

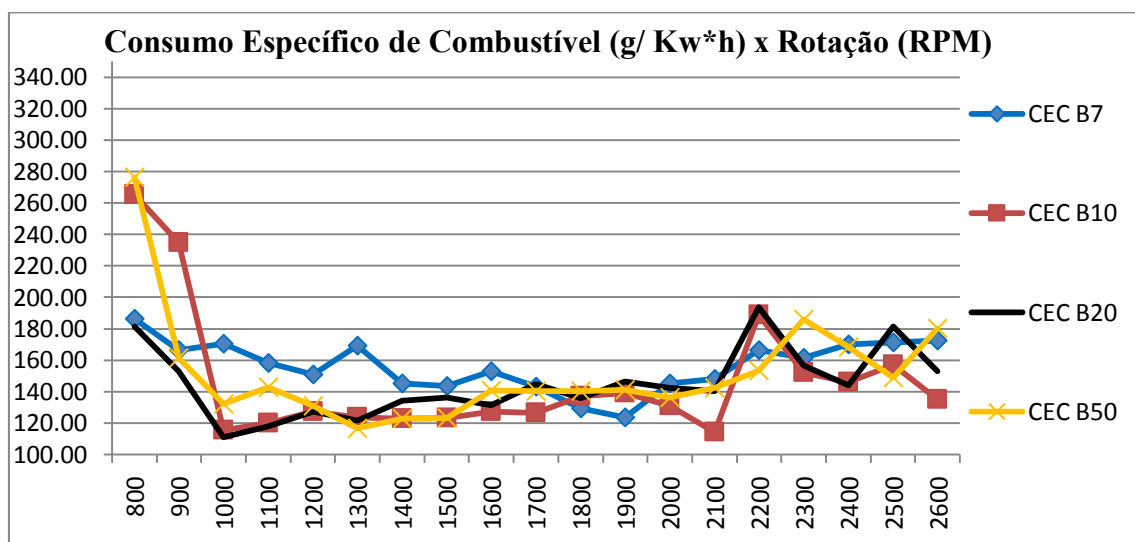


Figura 39 - Consumo Específico de Combustível x Rotação

Fonte: Autor

6.4. Curva da Quantidade de GNV para substituição de 50% de Biodiesel

A Figura 41 mostra os valores do energético em Megajoule referente a injeção de 50% de cada proporção de biodiesel analisada a determinada rotação.

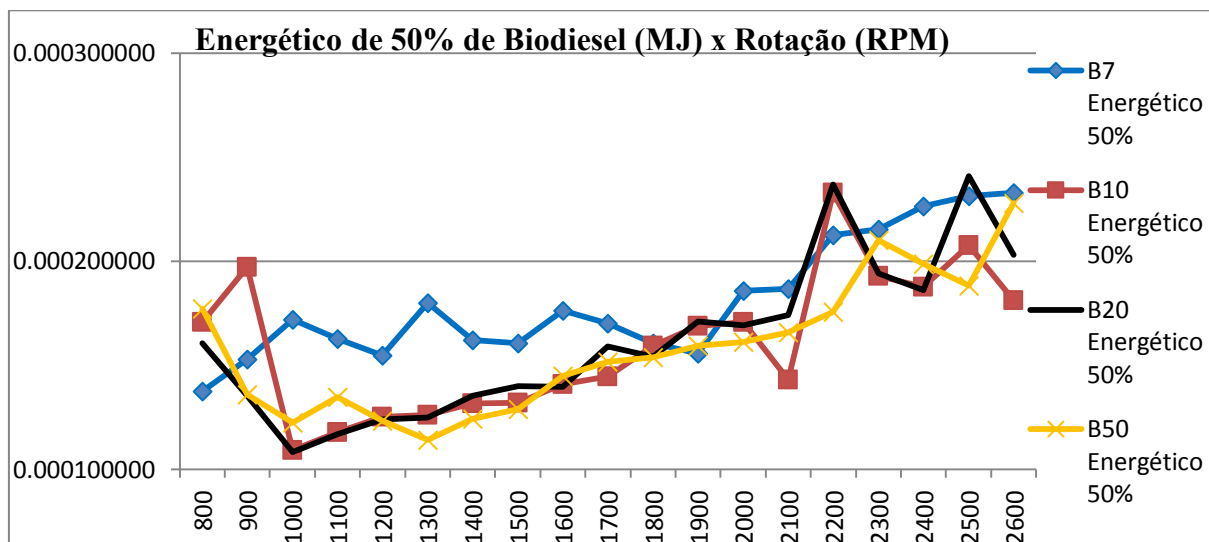


Figura 40 - Energético de 50% de Biodiesel x Rotação

Fonte: Autor

Percebe-se, da Figura 42, que os valores energéticos das proporções de B10, B20 e B50 tem menor diferença entre si, já o B7 apresenta maior quantidade de energia retirada em relação aos demais combustíveis ensaiados.

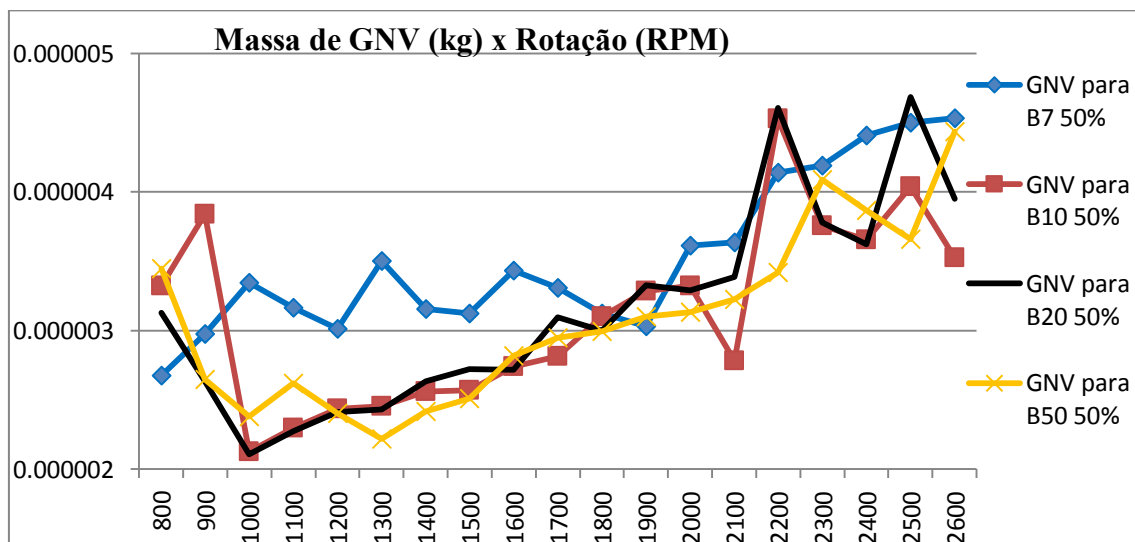


Figura 41 – Massa de GNV x Rotação

Fonte: Autor

Na Figura 42 tem-se a ilustração dos valores de massa de gás natural veicular necessário para repor a quantidade de 50% do energético da injeção de combustível de cada mistura de biodiesel.

Analisando a Figura 42, verifica-se a necessidade da injeção de maior quantidade de massa de GNV para suprir a demanda energética referente ao combustível B7, exceto nas faixas de rotação de 800, 900, 1900 e 2200 rpm.

A Figura 43, representa os valores de volume de gás natural veicular necessário, tendo em vista a unidade de comercialização para tal combustível ser utilizada em volume (m^3).

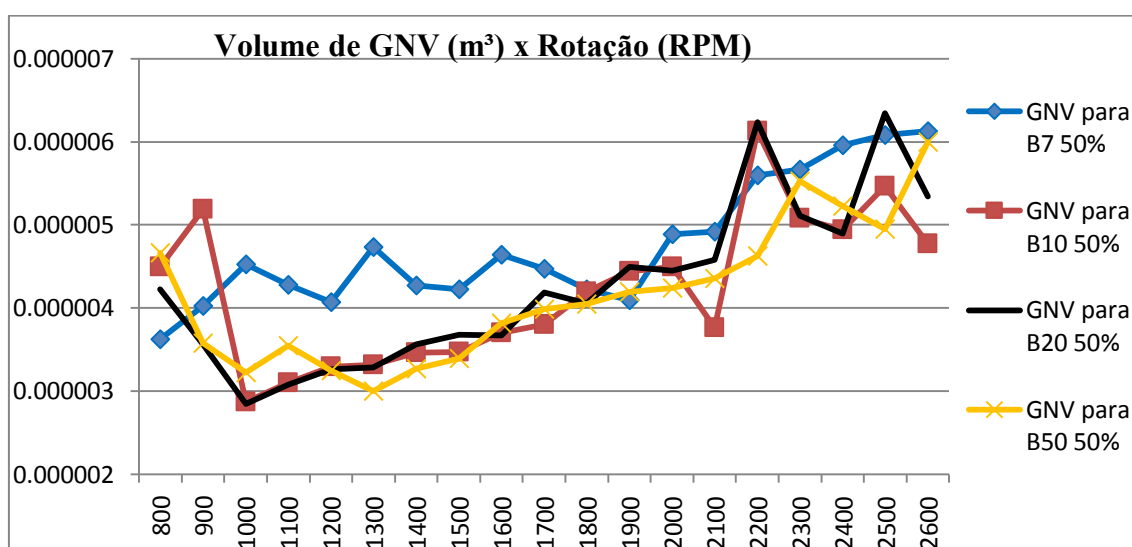


Figura 42 – Volume de GNV x Rotação

Fonte: Autor

6.5. Emissões na Exaustão

A Figura 44, mostra as médias dos valores medidos de monóxido de carbono (CO) em % de vol por faixa de rotação ensaiada.

Fazendo a análise da Figura 44, observa-se que as emissões de CO aumentam conforme a rotação sobe para cada combustível analisado, sendo o combustível B7 o que emitiu a menor % de CO e o Combustível B50 foi responsável pela maior emissão de CO em média.

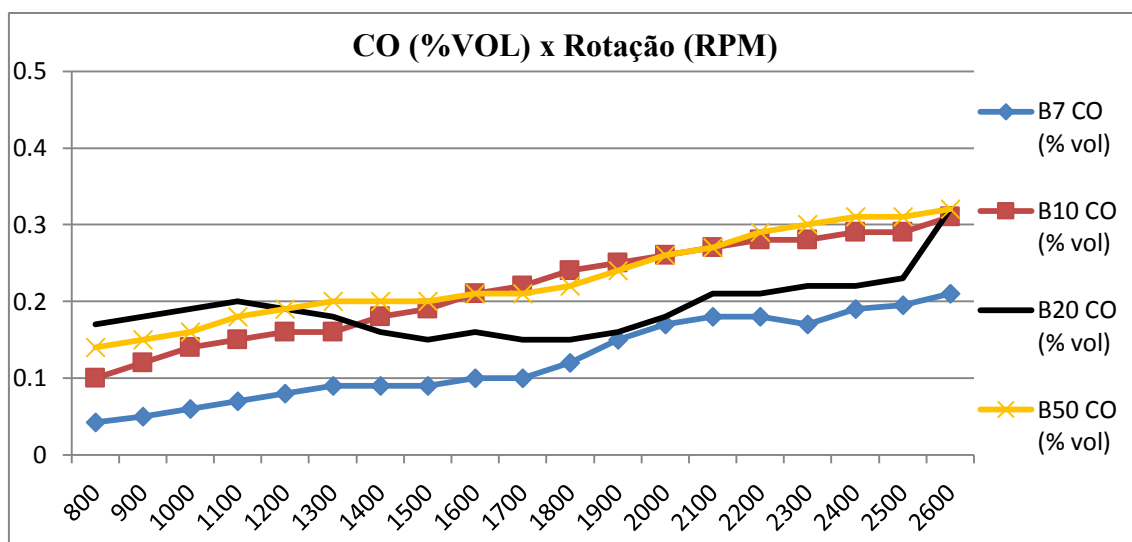


Figura 43 – CO x Rotação

Fonte: Autor

As médias de concentrações de dióxido de carbono (CO_2) para cada combustível experimentado estão ilustradas na Figura 45, sendo medida em % vol em cada rotação.

Pode-se verificar o acréscimo da porcentagem de emissão de CO_2 com o aumento da rotação do motor, tendo o combustível B20 menor emissão desse gás poluente, porém com leve vantagem dos demais combustíveis ensaiados.

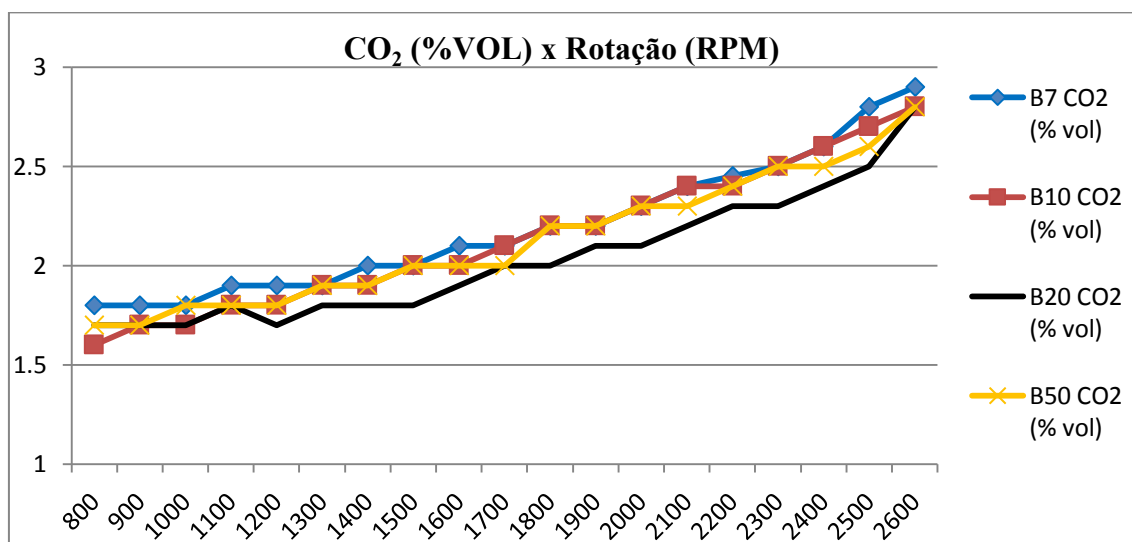


Figura 44 - CO₂ (%VOL) x Rotação

Fonte: Autor

A Figura 46, refere-se para cada combustível ensaiado a média das concentrações de oxigênio medida em % vol por faixa de rotação do motor experimentada.

Verifica-se uma tendência dos combustíveis B7, B10 e B50 de um leve decréscimo das concentrações de O₂ de acordo com aumento da rotação do motor, já o B20 apresenta um leve acréscimo nas concentrações de acordo com crescimento da rotação, porém é o combustível que apresenta menor curva de concentração de O₂.

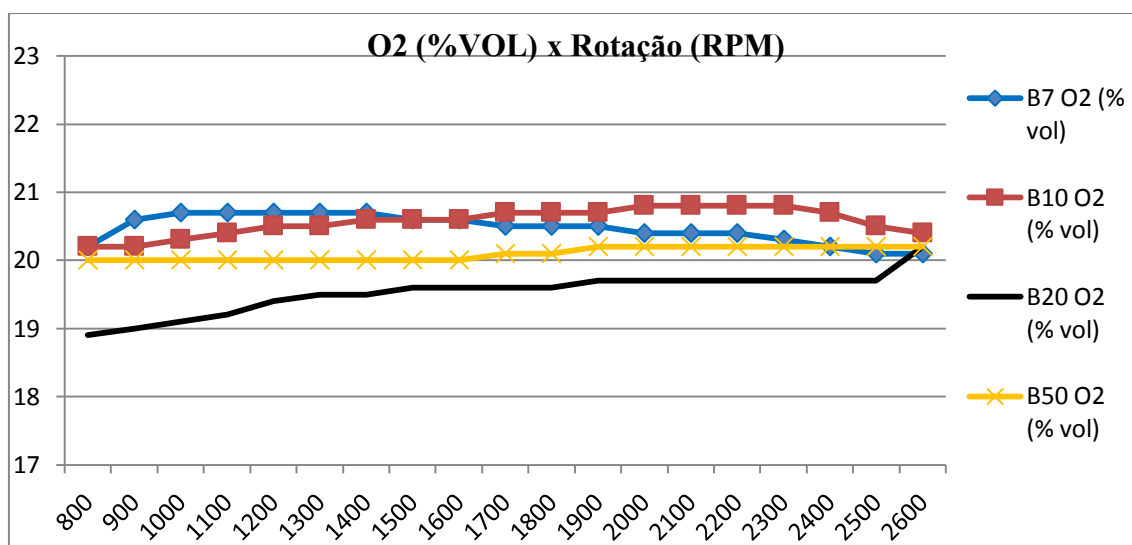


Figura 45 - O2 (%VOL) x Rotação

Fonte: Autor

A Figura 47, mostra as médias dos valores medidos da concentração de hidrocarbonetos (HC) em partes por milhão (PPM) para cada rotação ensaiada.

Analisando a Figura 47, nota-se que o maior nível de emissão de hidrocarbonetos ocorre com o ensaio do combustível B7, bem como um considerável aumento nas emissões de acordo com o acréscimo da rotação. Com o menor nível de emissão de hidrocarboneto, o combustível B50 manteve-se praticamente constante ao decorrer da faixa de rotação experimentada.

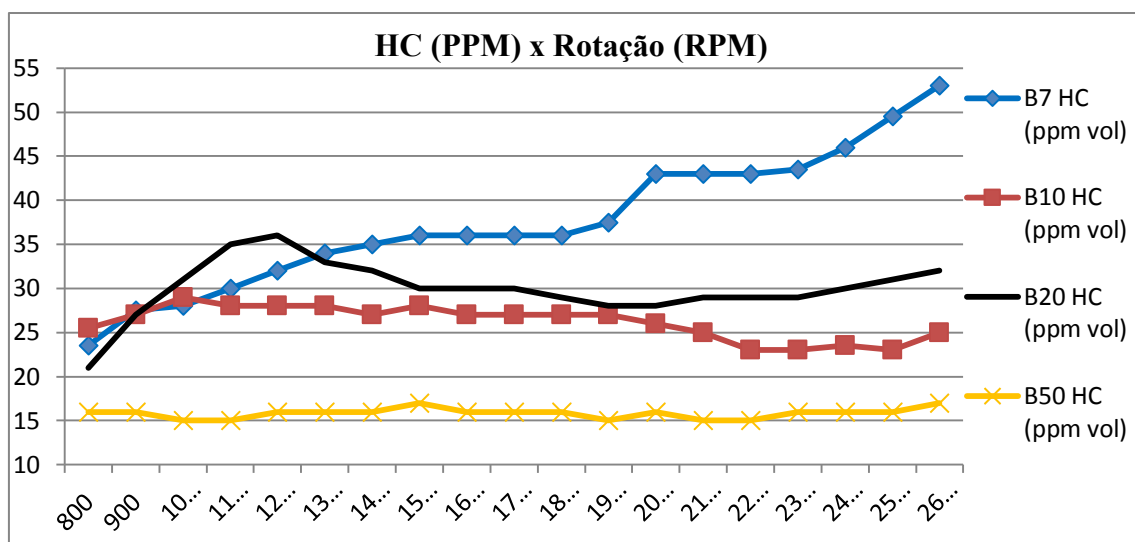


Figura 46 – HC x Rotação

Fonte: Autor

A Figura 48, informa as médias dos valores medidos de óxidos de nitrogênio (NO_x) em partes por milhão (PPM) a cada rotação experimentada.

É possível verificar que todas os combustíveis ensaiados tem um nível de emissão de NO_x mais elevado em baixas rotações o qual vai decrescendo com o aumento da rotação até chegar na faixa de rotação de 1800 rpm, onde nota-se que todos combustíveis tendem a formar picos de NO_x entre a faixa de rotação de 1900 a 2100 rpm, faixa a qual houve difícil estabilização do motor.

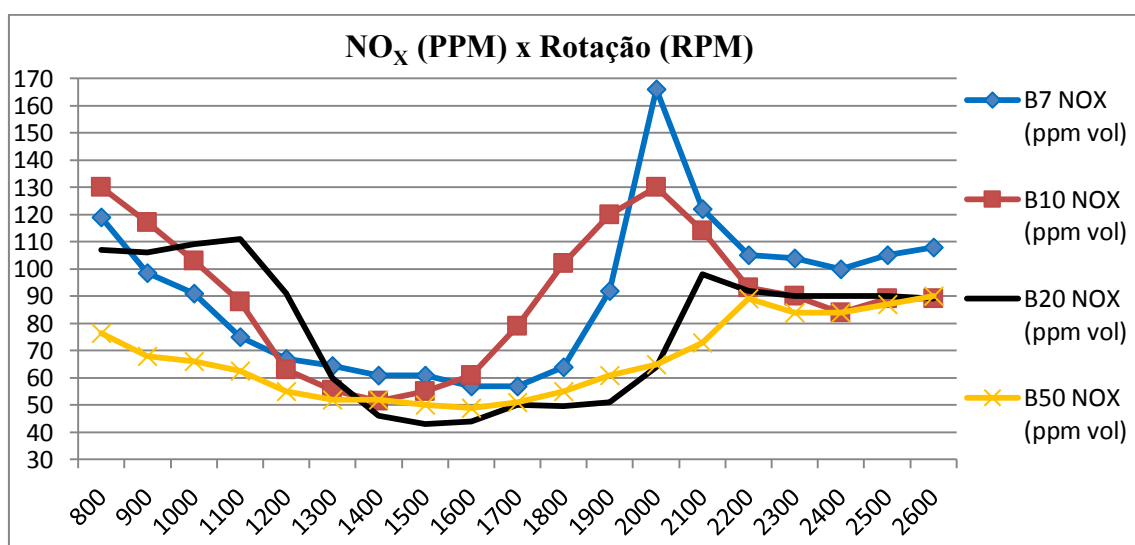


Figura 47 – NO_x (PPM) x Rotação

Fonte: Autor

6.6. Opacidade nos Gases de Exaustão

As figuras abaixo indicam de duas formas a opacidade medida no escapamento de exaustão do motor em estudo. Mensurando na Figura 49 em porcentagem, $N(\%)$ = porcentagem de enegrecimento por rotação (RPM), e na Figura 53 em coeficiente de absorção da luz – $K(m^{-1})$ por cada ponto de rotação do motor testado (RPM).

Na Figura 49, verifica-se a maior curva de opacidade referente a queima do combustível B50 e uma tendência do aumento da opacidade a partir do uso da porcentagem de 10% do biodiesel até 50%.

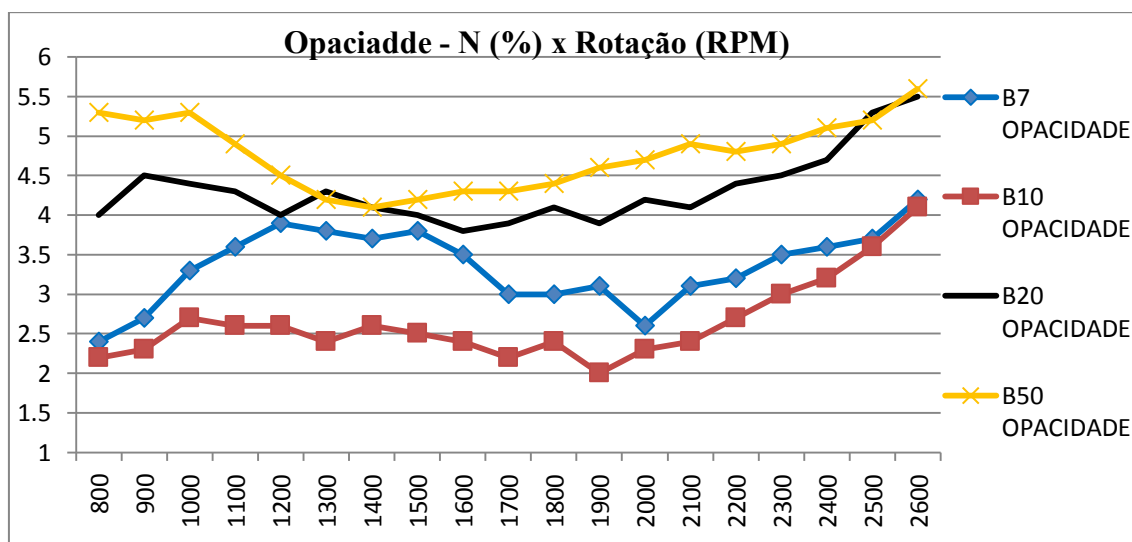


Figura 48 – Opacidade x Rotação

Fonte: Autor

Na Figura 50, tem-se a menor média do coeficiente de absorção da luz com o uso do combustível B10, verifica-se uma semelhança entre os resultados obtidos da Figura 49 e 50, já que são valores dependentes, havendo um espelhamento das curvas.

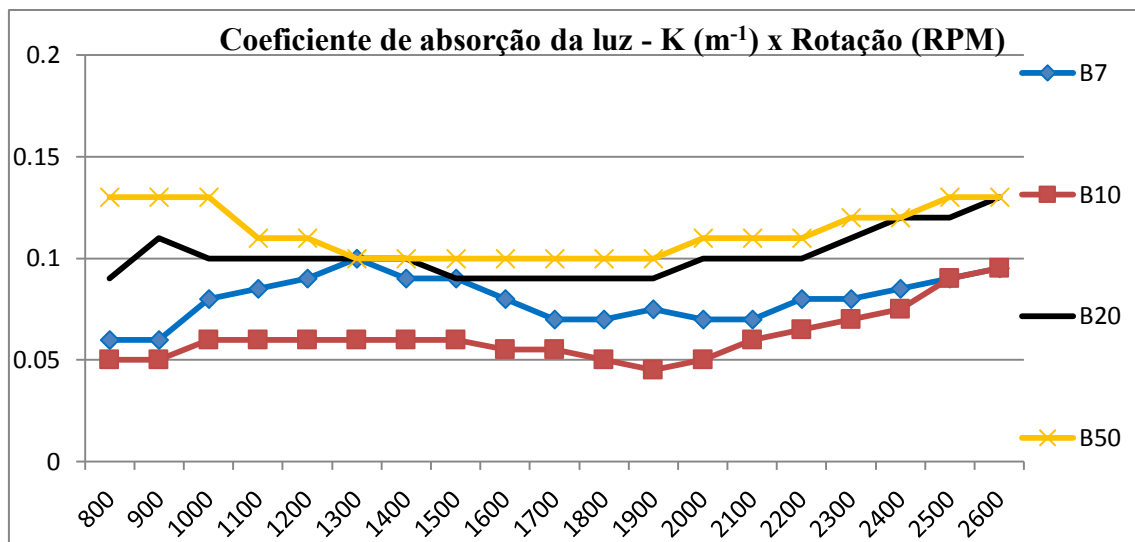


Figura 49 – K (coeficiente de absorção da luz) x Rotação

Fonte: Autor

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

7. Introdução

Neste capítulo são feitas as conclusões sobre as análises dos resultados apresentados nos ensaios realizados com diferentes proporções de biodiesel e o resultado do cálculo para estimar a quantidade ideal de injeção de GNV em substituição de 50% de cada proporção de biodiesel, bem como propõe sugestões para futuros trabalhos.

7.1. Conclusões

Sobre o tempo de injeção de combustível mensurado do sistema de injeção eletrônica do motor MWM 4.07 TCE, conclui-se que não há influência significativa da proporção de biodiesel utilizada em relação ao tempo de abertura dos bicos injetores.

Em questões de torque e potência, dentre as misturas analisadas com proporções entre 7% e 50 % de biodiesel, com o aumento da proporção de biodiesel no combustível tem-se uma leve diminuição nos valores gerados.

Da Figura 39, que refere-se ao consumo de combustível no tempo de medição de 180 segundos, conclui-se que o combustível que apresentou a curva indicando maior consumo nesse intervalo de tempo foi o B7. Já para consumo específico de combustível (CEC) a curva do combustível B10 demonstrou menor CEC exceto nos pontos de rotação de marcha lenta (800 rpm), 900 e 2200 rpm.

É possível concluir sobre a quantidade de GNV necessária para substituir 50% da injeção de biodiesel, que com a utilização do combustível B7 necessita-se de uma massa maior de GNV para ser injetada, devido a quantidade de energia presente no combustível B7 ser maior que nas outras amostras. Vale salientar que os dados levantados através da metodologia empregada nesse estudo servem de base para aprimoramento do mapa de injeção de GNV aplicado ao motor em análise, o qual em estudos anterior era mantido um valor fixo de tempo de injeção para todas as rotações.

Sobre as emissões de gases poluentes na exaustão do motor em estudo, analisando em toda faixa de rotação, conclui-se que: Em relação ao Monóxido de carbono (CO): B50 apresentou maior nível de emissão e B7 menor nível de emissão. Quanto ao Dióxido de carbono (CO₂): B7 apresentou maior nível de emissão e B20 menor nível de emissão. Analisando a concentração de Oxigênio (O₂): B7 e B10 apresentaram maior nível de emissão e B20 menor nível de emissão. Tendo em vista os Hidrocarbonetos (HC): B7 apresentou maior nível de emissão e B50 menor nível de emissão. Referindo-se aos Óxidos de nitrogênio (NO_x): B7 apresentou maior nível de emissão e maior pico e B50 menor nível de emissão.

Sobre a opacidade medida nos gases de exaustão e o coeficiente de absorção da luz (K), analisando em toda faixa de rotação, conclui-se que: A Opacidade (%): apresentou maior nível com utilização do combustível B50, já com B10 houve menor nível de opacidade. O Coeficiente de absorção da luz (K): B50 apresentou maior nível e B10 apresentou menor nível.

7.2. Sugestões para futuros trabalhos

Como sugestão para um futuro trabalho seria relevante o levantamento experimental da curva de tempo da injeção de GNV. Tomando como base a curva de massa necessária a ser injetada de GNV para substituir as porcentagens que se deseja trabalhar de biodiesel.

Aplicando a metodologia utilizada nesse trabalho é possível ter curvas de massa de injeção de GNV para substituir as mais diversas proporções (20 a 80%) de biodiesel, tendo como referência a massa de GNV necessária para reposição da energia subtraída das porcentagens de injeção de biodiesel.

Sugere-se também o estudo da análise da injeção do GNV em variadas proporções, chegando até 80%, em motores de ignição por compressão utilizando diferentes proporções de biodiesel.

REFERÊNCIAS.

- ANP Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Resolução N° 7, de 9 de fevereiro de 2011. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br>>. Acesso em: 13 jun. 2016
- ANP Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Resolução N° 16, de 17 de junho de 2008 Disponível em: <<http://www.anp.gov.br>>. Acesso em: 13 jun. 2016
- ANP Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Resolução N° 19, 15 de abril de 2015 Disponível em: <<http://www.anp.gov.br>>. Acesso em: 13 jun. 2016
- ANP Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Resolução N° 50, 23 de dezembro de 2013 Disponível em: <<http://www.anp.gov.br>>. Acesso em: 13 jun. 2016
- ANP Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Resolução N° 51, 25 de novembro de 2015 Disponível em: <<http://www.anp.gov.br>>. Acesso em: 13 jun. 2016
- Barbosa, R. L.; Silva, F. M.; Salvador, N.; Volpato, C. E. S. Desempenho Comparativo de um Motor de Ciclo Diesel Utilizando Diesel e Misturas de Biodiesel. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1588-1593, out. 2008.
- BRUNETTI, F. Motores de Combustão Interna: Volume 1. São Paulo: Blucher, 2012.
- Çengel Y.A, Boles M.A., Termodinâmica. 5ª ed. São Paulo. McGraw-Hill, 2006
- Degobert P (1995) Automobiles and Pollution. Society of Automotive Engineers, Inc., Éditions Technip. USA y París.
- FERGUSON, C.; KIRKPATRICK, A. *Internal Combustion Engines: Applied Thermosciences*. Wiley, New York, 2001.
- GARCIA, R., 2002, “Combustíveis e Combustão Industrial”. Rio de Janeiro: Interciência.
- HEYWOOD, J. *Internal combustion engine fundamentals*. 1ªed. McGraw-Hill, Singapore, 1988.
- Majewski, W.A.e M.K.Khair (2006) Diesel Emissions and their Control. SAE Publications, Warrendale. Society of Automotive Engineers (SAE) (2002)SAE J2711 – Recommended Practice for Measuring Fuel

Marcelo José da Silva, UNIOESTE, PPGEA – Programa de Pós Graduação em Energia na Agricultura: Valor calorífico para composições com biodiesel da gordura de frango e óleo diesel

Marcelo José da Silva, Rev. bras. eng. agríc. ambient. vol.16 no.3 Campina Grande 2012

MARTINELLI, Luiz Carlos Jr. Apostila Motores de Combustão Interna. Unijui.

MARTINS, Jorge. Motores de Combustão Interna. 2ª Edição. Publindústria Edições Técnicas, 2006.

MAUS, Alex. Estudo da Viabilidade de Construção de um Dinamômetro de Rolos. Trabalho de Conclusão de Curso. 2010.

MORAN, Michael J.; SHAPIRO, Howard N.. Princípios de Termodinâmica para Engenharia. 4. ed. LTC: Rio de Janeiro, 2002.

Mineração Rio Norte. Tecnologia do Motor Diesel I. Projeto Multifunção, 2009.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2009 “*PROCONVE: Programa de controle de poluição do ar por veículos automotores*”. Disponível em http://www.mma.gov.br/estruturas/163/_arquivos/proconve_163.pdf

OBERT, E. F., 1971, “Motores de combustão interna”. Porto Alegre: Globo.

PENIDO FILHO, Paulo. Os motores de combustão interna: para cursos de máquinas térmicas, engenheiros, técnicos e mecânicos em geral que se interessam por motores. Belo Horizonte: Lemi, v. 2, 1996.

PIMENTEL, D.; PATZEK, T. W. Ethanol production using corn, switchgrass, and Word; Biodiesel production using soybean and sunflower. Natural Resources Research, Minnesota, Duluth, v. 14, n. 1, March, 2005.

RAMOS, L. P. Degradação térmica de óleos comestíveis. Centro de Pesquisa em Química Aplicada do Departamento de Química da UFPR. 2004. Disponível em: <http://www.universia.com.br/materia/materia.jsp?id=2799> Acesso em: 23/06/09.

ROBERT, Bosch. Manual de Tecnologia Automotiva. 25ª Edição. Edgard Blücher, 2004.

RONCONI, Luís Eduardo. Aspectos Básicos na Implementação de Sistemas de Ensaio de Motores a Combustão Interna. Dissertação de Mestrado. Julho de 1986.

SILVA, Fernando; AVILES, Flavio; MORAES, Eider. Montagem de Bancada de Ensaio Dinamométricos em Motor Diesel. UNISANTA, 2008.

VLASSOV, D. Fundamentos de Combustão. UTFPR, 2008.

WYLEN, G. J.V., SONNTAG, R. E., BORGNAKKE, C., 2001, “Fundamentos da termodinâmica”, 5 ed. São Paulo: Edgard Blücher.

YOSHIKAWA, K., 2006, “R&D (Research and Development) on distributed power generation from solid fuels”. Elsevier/Energy, Science@Direct.

<http://dicasengenharia.blogspot.com.br/2008/12/visao-geral-do-sistema-de-injeo-diesel.html>